

VYSOKÁ ŠKOLA BÁŇSKÁ – TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA

UNIVERZITNÍ STUDIJNÍ PROGRAMY

Návrh a realizace systému servořízení demonstračního vozidla  
s elektrickým pohonem

Design and Practical Realization of the Power Steering System for  
Demonstration Electric Vehicle

Student:

Bc. Jiří Kováč

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Petr Šimoník, Ph.D.

Ostrava 2014

## Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Jiří Kováč**  
Studijní program: **N3943 Mechatronika**  
Studijní obor: **3906T007 Automobilová elektronika**  
Téma: **Návrh a realizace systému servořízení demonstračního vozidla s elektrickým pohonem**  
**Design and Practical Realization of the Power Steering System for Demonstration Electric Vehicle**

Zásady pro vypracování:

1. Na základě doporučení vedoucího diplomové práce proveďte teoretický návrh celkové koncepce elektronického servořízení pro specifické vozidlo s elektrickým pohonem.
2. Dle stanovených parametrů vyberte vhodný typ pohonu a prakticky realizujte základní šasi pro zprovoznění pohonu a vývoj řídicího programu.
3. Na realizovaném vzorku servořízení proveďte vývoj řídicího programu s možností zadávání povelů od nadřazeného řídicího systému.
4. Proveďte zástavbu servořízení do struktury specifického vozidla s elektrickým pohonem.

Seznam doporučené odborné literatury:


VLK, F.: Elektronické systémy motorových vozidel 1, 2. Prof. Ing. František Vlk, DrSc., nakladatelství a vydavatelství, Brno 2002, ISBN 80-238-7282-6  
VLK, F.: Elektrická zařízení motorových vozidel. Prof. Ing. František Vlk, DrSc., nakladatelství a vydavatelství, Brno 2005, ISBN 80-239-3718-9  
ŠTĚRBA, P.: Elektrotechnika a elektronika automobilů. Computer press, Praha, 2004  
ERJAVEC, J.: Automotive Technology: A Systems Approach, 4th Edition, USA 2004, Thomson Learning, 1401 str., ISBN 1-4018-4831-1  
RIBBENS, B., W.: Understanding Automotive Electronics, Sixth Edition, USA 2003, Elsevier Science, 480 str., ISBN 0-7506-7599-3  
BOSCH technické brožury, žluté sešity 1996-2013

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

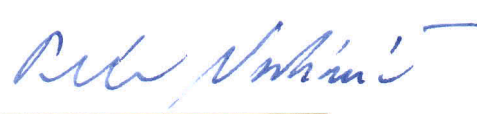
Vedoucí diplomové práce: **Ing. Petr Šimoník, Ph.D.**

Datum zadání: 13.12.2013

Datum odevzdání: 19.05.2014

  
doc. Ing. Petr Palacký, Ph.D.  
vedoucí katedry



  
prof. Ing. Petr Noskovič, CSc.  
prorektor pro studium

### Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě dne 19. 5. 2014

---

J. Kováč

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. – autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že jeden výtisk diplomové práce bude uložen v Ústřední knihovně VŠB-TUO k prezenčnímu nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o diplomové práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě dne 19. 5. 2014

---

J. Kováč

Bc. Jiří Kováč

Heřmanovice 515, 793 74 Heřmanovice



Na tomto místě bych rád poděkoval Ing. Petru Šimoníkovi, Ph.D., Ing. Jiřímu Takáčovi a celému týmu za odborné vedení a cenné rady, které mi byly poskytnuty pro vypracování práce.

## **ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE**

KOVÁČ, J. *Návrh a realizace servořízení demonstračního vozidla s elektrickým pohonem: Diplomová práce*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Univerzitní studijní programy, 2014, 50 s. Vedoucí práce: Šimoník, P.

Diplomová práce se zabývá návrhem a realizací servořízení demonstračního vozidla s elektrickým pohonem – Democar. V úvodu textové části je zmíněno rozdělení konvenčních typů servořízení. Následuje teoretický popis koncepce servořízení. Výběr užitých komponentů je doložen řadou výpočtů, popisem funkce, katalogovými hodnotami a grafy. Textová část popisující praktickou realizaci obsahuje mimo jiné detailní popis řídicí jednotky servořízení (SCU) s popisem funkcí a parametrů jednotlivých obvodů. V rámci vývoje softwarové řídicí aplikace je uveden popis vývojových diagramů a jednotlivých přepočtů ke správnému natáčení kol dle stanovených požadavků. V závěru práce je popsána zástavba navržené koncepce do struktury vozidla.

## **ANNOTATION OF DIPLOM THESIS**

KOVÁČ, J. *Design and implementation of a demonstration power steering electric vehicles: Thesis*. Ostrava: VŠB – Technical University of Ostrava, Study programs of the university, 2014, 50 p. The thesis head: Šimoník, P.

The thesis concerns the design and realization of the power-assisted steering of the demonstration vehicle with electric drive – Democar. At the beginning of the text part, convectional power-assisted steering types dividing is mentioned. The theoretical description of the power-assisted steering is following. The selection of the used components is supported with the number of calculations, function descriptions, listing values and graphs. The textual part describing the practical realization also includes detailed description of the power-assisted steering controlling unit (SCU) with the functions and parameters description of the particular circuits. Within the purview of the controlling application software development, the description of the flow charts and particular calculations for correct turning of the wheels according to prescribed demands is given. The goal of the thesis is the implementation of the suggested conception into the vehicle structure described.

**KLÍČOVÁ SLOVA** servořízení, krokový motor, elektromobil, CAN

**KEY WORDS** power-assisted steering, stepping motor, electric car, CAN

# Obsah

<b>Seznam použitých symbolů a značek .....</b>	<b>8</b>
<b>Úvod .....</b>	<b>10</b>
<b>1 Teoretická koncepce servořízení vozidla DEMOCAR.....</b>	<b>11</b>
1.1 Modely elektrických pohonů .....	12
1.1.1 Krokové motory .....	12
1.2 Výpočty pro výběr typu motoru.....	15
1.2.1 Volba lineárního vedení.....	16
1.2.2 Krokový motor se zpětnou vazbou .....	18
1.3 Návrh struktury elektroniky servořízení .....	20
1.4 Měnič krokového motoru.....	20
1.4.1 Parametry měniče .....	21
1.4.2 Možnosti zasílání příkazů kontroléru .....	23
1.5 Řídicí část aplikace .....	24
1.5.1 Tower systém PXS20.....	25
1.6 Návrh spojení lineárního vedení a hlavní řídicí tyče .....	26
<b>2 Praktická realizace .....</b>	<b>28</b>
2.1 Návrh vlastní jednotky .....	28
2.2 Začlenění realizovaného systému do struktury.....	33
2.3 Vývoj aplikačního software .....	34
2.3.1 Operační systém.....	34
2.3.2 Výpočty pro softwarovou implementaci.....	35
2.3.3 Vlastní popis vyvíjeného softwaru .....	37
2.4 Ověření funkčnosti a měření.....	42
<b>3 Závěr .....</b>	<b>46</b>
<b>4 Seznam použité literatury .....</b>	<b>47</b>
<b>5 Seznam příloh.....</b>	<b>50</b>

## Seznam použitých symbolů a značek

ADC	Analog Digital Converter – analogově digitální převodník
CAN	Controller Area Network – komunikační sběrnice
DC	Direct Current – např. označení pro stejnoměrný proud, napětí
DB	Konektor
SPI	Komunikační rozhraní
FIFO	First in, First out – první dovnitř, první ven
GND	Ground – označení zemnění (nulového potenciálu)
JTAG	Joint Test Action Group – označení konektoru pro programování
MCU	Micro Controller Unit – mikrokontrolér
MQX	Message Queue Executive – označení operačního systému
PC	Personal Computer – osobní počítač
RS485	Sériové rozhraní
RT	Real Time – reálný čas
RTOS	Real Time Operating System – operační systém reálného času
ŘJ	Řídicí jednotka
SCU	Steering Control Unit – řídicí jednotka řízení
SMD	Surface Mount Device – součástky určené pro povrchovou montáž
UART	Universal Asynchronous Receiver/Transmitter univerzální synchronní/asynchronní sériové rozhraní
XY25	Označení spojky

$D$	[mm]	průměr šroubu
$D_{MIN}$	[mm]	malý průměr šroubu
$D_{STR}$	[mm]	střední průměr šroubu
$Er$	[-]	rozlišení enkodéru za otáčku
$f$	[-]	součinitel tření
$f_s$	[Hz]	frekvence impulzů
$F_{VYS}$	[N]	výsledná síla
$F_{TR}$	[N]	síla tyče řízení
$F_Z$	[N]	síla zatížení jednoho kola
$g$	[m.s <sup>-2</sup> ]	gravitační zrychlení
$h$	[mm]	stoupání závitů lineárního vedení
$k_A$	[-]	koeficient přepočtů pulzů

$k_C$	[mm]	délka ramene
$k_S$	[mm]	vzdálenost uchycení natáčecího segmentu
$KE$	[-]	přepočet pulzů
$Km$	[-]	mikrokrokování
$l_{OVL}$	[mm]	délka ovládacího ramene
$L_{VED}$	[mm]	účinná délka vedení
$m$	[kg]	hmotnost
$m_f$	[-]	počet pulzů
$m_s$	[-]	počet fází
$m_{FK}$	[-]	přepočtená hodnota pulzů skrze koeficient
$M_{HT}$	[Nm]	hnací moment motoru
$M_k$	[Nm]	krouticí moment
$M_{PR}$	[Nm]	moment pro otočení jedním kolem
$M_{ROZ}$	[Nm]	rozběhový moment
$M_{VPM}$	[Nm]	minimální hnací moment
$p_r$	[-]	počet pólových párů rotoru
$p_s$	[-]	počet pólových párů statoru
$P_o$	[-]	kroky za otáčku
$p_{LV}$	[mm]	posuv vedení
$p_{OTM}$	[-]	počet otáček
$S_k$	[mm]	šířka kola
$S_{ZAT}$	[N]	dynamické zatížení
$x_{KC}$	[mm]	délka posuvu vzdálenosti
$x_{PC}$	[mm]	délka posuvu vzdálenosti
$\alpha$	[rad]	úhel kroku
$\alpha_{sr}$	[°]	úhel stoupání závitů
$\alpha_Z$	[°]	požadovaná hodnota úhlu natočení kol
$\delta$	[°]	úhel natočení segmentu
$\xi$	[°]	úhel natočení ovládacího ramene
$\eta_{sr}$	[-]	účinnost šroubového převodu
$\varphi$	[rad]	úhel natočení
$\pi$		konstanta (Ludolfovo číslo)
$v$	[-]	počet kroků
$\omega$	[-]	střední hodnota otáčení

## Úvod

K provozování a vůbec k ovládání jakéhokoliv vozidla jsou zapotřebí funkční celky sloužící nejen k ulehčení ovládání, ale také k zajištění maximální bezpečnosti v souvislosti s pohodlím obsluhy. Tyto celky se mohou dělit na celek pohonu, brzd, řízení a další. Tato diplomová práce bude orientována právě na jeden ze zmíněných celků.

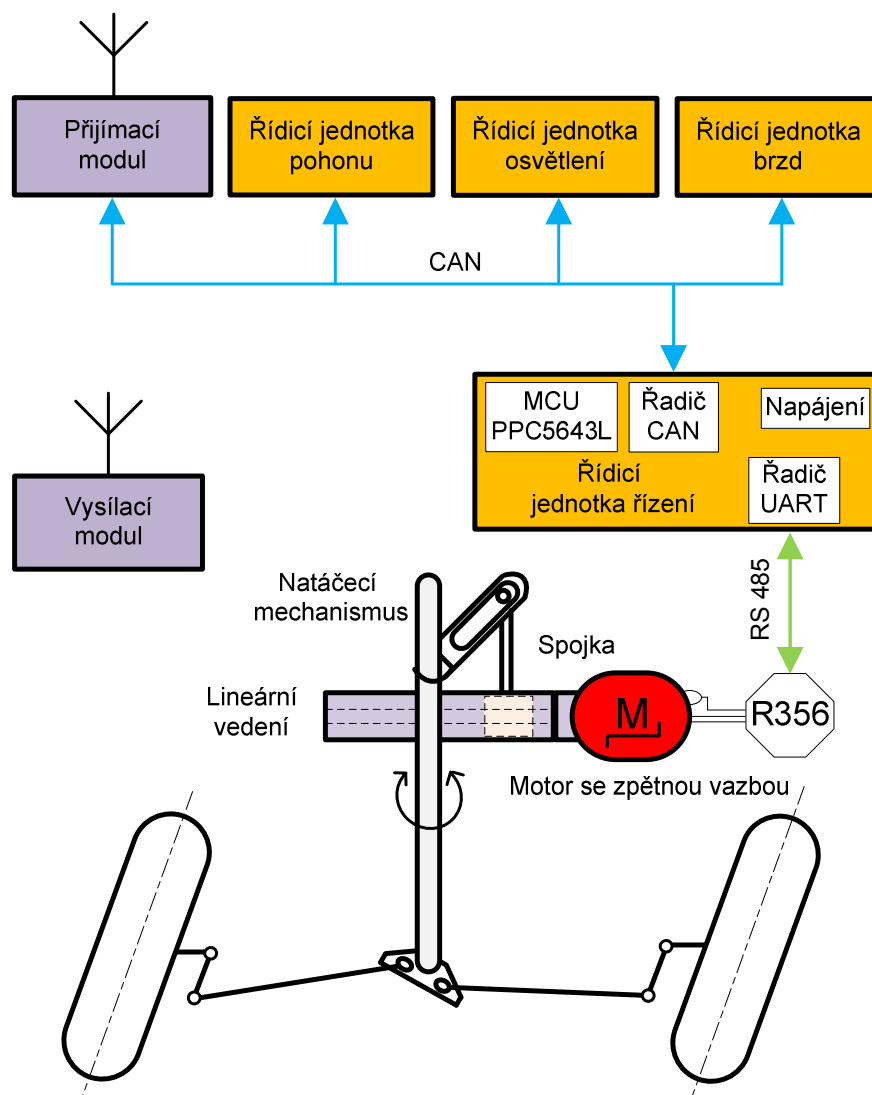
Celek řízení sloužící k správné manévrovatelnosti vozidla byl zpočátku vytvářen čistě mechanicky. Volant propojený s řídicí tyčí byl spjat s jistým převodním mechanismem, např. tzv. šnekem, a díky síle vyvinuté řidičem a následně přenášené skrze volant nastávala adekvátní změna při natáčení kol. Aby řidičova vynaložená síla byla co nejmenší, byl volant řízení vyráběn co největší (fyzikální princip). Samozřejmě toto řešení přinášelo velké množství záporů, proto byly objevovány a konstruovány jiné způsoby řízení. Novodobějším a snad dodnes nejrozšířenějším řízením je řízení ovládané hydraulicky, respektive elektrohydraulická kombinace. Vývoj také neopomenul řízení založené čistě na elektronickém principu. Pevná vazba spojení volantu a mechanismu řízení je odstraněna a informace jsou přenášeny „drátem“ dvěma aktuátorům, tzv. STEER BY WIRE. Automobilový průmysl oproti leteckému prozatím tyto změny legislativně nepodporuje.

Novodobější koncepční řešení přinášejí řadu výhod, hlavně díky svým posilovacím účinkům, které jsou v požadovaných situacích variabilní.

Cílem diplomové práce je návrh, praktická realizace a zabudování systému řízení do specifického vozidla s elektrickým pohonem. Servořízení bude založeno na výše zmíněném principu řízení STEER BY WIRE. Stejně jak je tomu tak u těchto novodobých moderních systémů, bude můj řídicí systém ovládán z dalšího řídicího systému, a to skrze informace z vysílacího modulu. V práci budou teoreticky popsány základní komponenty s vhodným typem pohonu. Bude také kladen důraz na hledisko softwarového přizpůsobení ve formě programu. Nebudou opomenuty patřičné požadované výpočty s vývojovými diagramy.

Závěr práce bude pojednávat o celkovém zabudování servořízení do specifického vozidla – DEMOCARU.

# 1 Teoretická koncepce servořízení vozidla DEMOCAR



Obr. 1 Komplexní struktura vozidla – pohled zepředu

U vozidla Democar se jedná o klasické řízení často využívané u čtyřkolek, segment zobrazený na obr. 1 je pevně spojen s tyčí řízení. Vlivem táhel ve spojení s kulovými čepy je převáděno natáčení řídicí tyče na požadované úhly natočení jednotlivých kol. Aby byla zachována geometrie, je navrženo takové koncepční řešení, které umožní nezasahovat mezi spojení segmentu s jednotlivými koly. Z obrázku je patrné, že aktuátor natočení kol, tj. celkový komplexní mechanismus motorku s lineárním vedením, působí skrze řídicí tyč. Mechanismus je ovládán kontrolérem R356, tvořícím s ŘJ řídicí část. Z blokového schématu je patrné, že veškeré jednotky ve vozidle spolu komunikují skrze CAN sběrnici.

## 1.1 Modely elektrických pohonů

Elektrické pohony jsou u mechatronických systémů zastoupeny v celé řadě a značné rozmanitosti. Slouží převážně k vytváření sil a pohybů pro mechanické systémy. Jako příklady mohou sloužit elektrické motory k pohonu pracovních strojů nebo elektrické aktuátory (servomotory) k pohonu subkloubu. V obou dvou případech lze přímo vytvořené síly a pohyby převodů v translačních nebo rotačních formách rozeznat. Elektrické pohony pro přímé vytvoření translačního pohybu jsou elektromagnety a lineární vedení.

Pro elektrické pohony k přímému vytváření rotačních pohybů se používají elektromotory. Jsou známy v mnoha různých provedeních a formách. Prvotním rozdělením bývají nejmenší motory do 0,75 W, malé motory do 750 W a velké motory, přičemž první dvě skupiny, tj. nejmenší motory a malé motory dominují ve většině běžných aplikačních oblastí. Nejdůležitější konstrukční varianty elektromotorů jsou stejnosměrné a střídavé motory. [8]

### 1.1.1 Krokové motory

Jsou speciálním druhem mnoho pólových synchronních motorů. Skládají se ze statoru s jednotlivými vinutími. Rotor je složen z permanentních magnetů nebo dle reluktančního principu postaven s např. hvězdicovými uspořádanými póly nebo zuby. Skrze řízení určitých statorových vinutí stejnosměrnými řídicími impulsy vytváří krokový motor jisté rotační změny úhlu. Díky příslušným opatřením, kdy při rozběhu a doběhu se žádné kroky neztrácejí, následuje rotační změna úhlu skrze předepsaný počet řídicích impulsů odpovídajících otevřenému řídicímu řetězci (magnetickému rastru), kde úhel natočení lze vypočítat vztahem:

$$\varphi = \alpha \cdot \nu \quad (1)$$

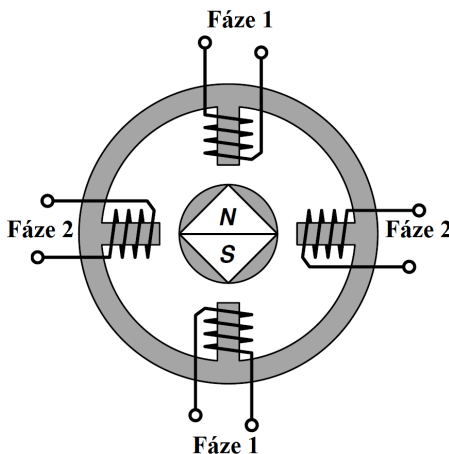
Samozřejmě, že při konstantních impulsech odpovídá střední hodnota otáčení:

$$\omega = \frac{d\varphi}{dt} = \alpha f_s \quad (2)$$

Činnostní princip odpovídá synchronnímu motoru, protože krokově řízené změně úhlu statorového pole následuje rotor. Základní uspořádání elektromechanické koncepce vychází z bezkartáčového stejnosměrného motoru. Skrze rozdílné uspořádání statoru a rotoru je známo více výrobních typů.



Stator je zkonstruován z více vinutí, která mohou být zapojena do 1, 2, 3 nebo 4 fází (jeden až čtyřfázový krokový motor), např. viz *obr. 2*, kde je patrné uspořádání fází a pólů. Fáze 1 a Fáze 2 jsou nazývány tzv. pólovými páry.



*Obr. 2 Zjednodušený příklad krokového motoru s permanentním rotorem*

Jsou-li přepínána 2 sousední vinutí, pak se motor nastaví do středu pólové osy. Tomuto stavu se říká „provoz s plným krokem“, a je tak také získáván relativně velký krouticí moment. Připojí-li se mezi pozice s plným krokem pouze jedno vinutí, pak je úhel kroku poloviční na úkor menšího neobvyklého krouticího momentu. To je tzv. „provoz s polovičním krokem“. V případě, že je zvyšován stupňovitě proud jednoho vinutí a v sousedním vinutí je odpovídajícím způsobem zredukován, nastává možnost ještě menšího úhlu kroku, který je označován „provoz s mikro krokem“. K obrácení chodu motorku nastává nutnost obrácení proudu vinutími nebo spínání jedné ze dvou rozdílně navinutých cívek.

Rotor může být složen z permanentních magnetů uspořádaných do hvězdicovitého tvaru se střídající se polaritou, která může mít až 12 pólových párů. Skrze tyto stálé magnety je zabezpečen tzv. samospínací moment v bezproudovém stavu. Dále to mohou být reluktanční rotory skládající se z ozubených kol vyrobených z měkkého železa s určitým počtem zubů, které nejsou předem zmagnetizovány. Skrze zuby a sled drážek je vytvořen proměnlivý magnetický odpor a s ním v souvislosti jistá momentová produkce. Tento konstrukční typ umožňuje malé kroky, ovšem není zajištěn samospínací moment. Další alternativou je hybridní rotor, který zajišťuje kombinaci zmíněných: Rotor je složen z jednoho v axiálním směru zmagnetizovaného permanentního magnetu, který má na obou stranách ozubené pólové boty z měkkého železa. Zuby ozubených kol jsou o polovinu

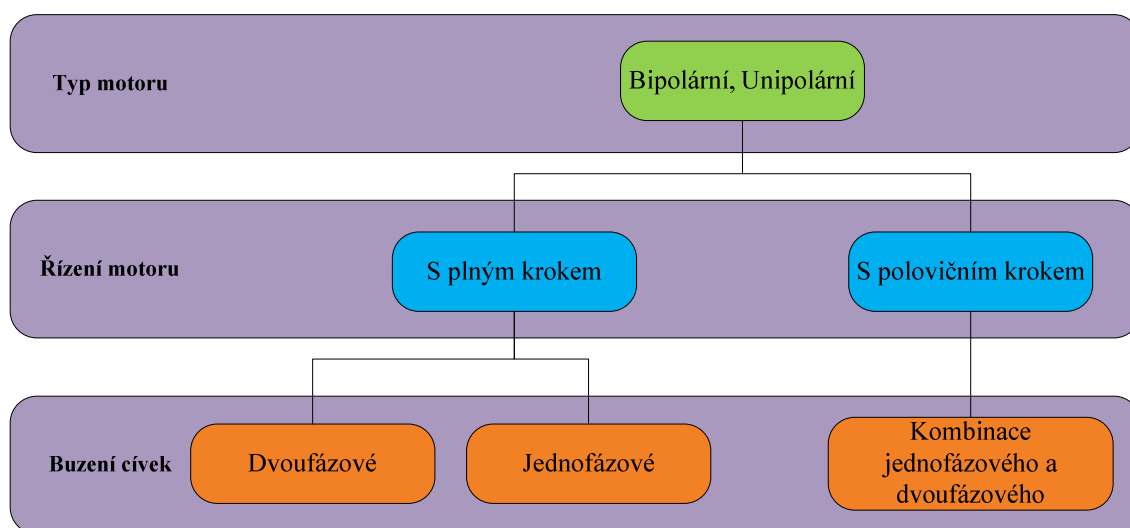
rozteče přesazeny. Tvoří tak na jedné straně pouze severní póly a na druhé jižní. Tímto je možno dosažení velmi malých úhlů kroku.

Na *obr. 2* je vyobrazeno schématické uspořádání krokového motoru s permanentním rotorem. Stator je složen ze čtyř vinutí a dvou fází. Vlivem přepólování jednoho statorového pólového páru jsou umožněny čtyři kroky. Rotor může mít dva nebo pět pólových párů. Je-li přepólován jeden pólový pár statoru, pak se motor otáčí o jeden rotorový pól dále, a tím se nastavuje do střední magnetické polohy. Z toho plyne 20 kroků na otáčku nebo úhel kroku  $18^\circ$ . Úhel kroku krokového motoru je tedy určen počtem vinutí, resp. počtem fází statoru a počtem pólových párů rotoru, přičemž pro provoz s polovičním krokem platí vztah:

$$\alpha = \frac{360^\circ}{2 \cdot m_s \cdot p_r} \quad (3)$$

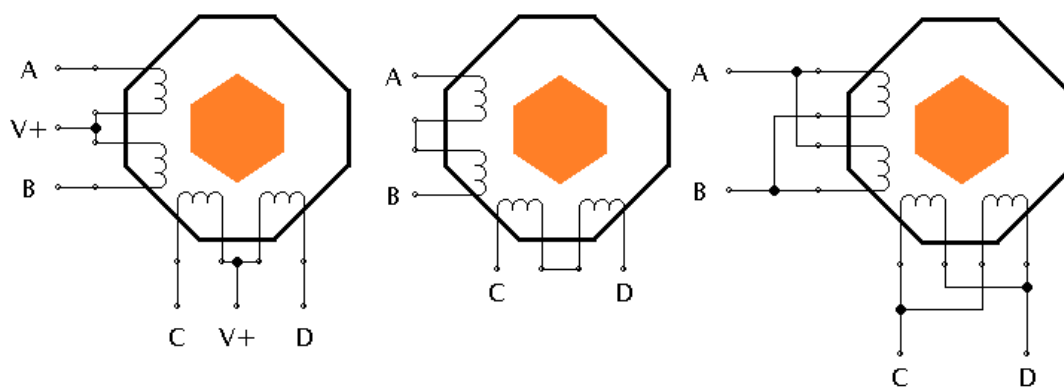
Tento úhel je možné tzv. pólovými boty ještě zmenšit. Pro permanentní motory jsou typické vzdálenosti kroků  $30^\circ$ - $90^\circ$ , pro reluktanční motory  $0,2$ - $15^\circ$  a u hybridních se pohybují délky kroků od  $0,9^\circ$ - $3,6^\circ$ . [8] [6]

Jedno z možných dělení krokových motorků z pohledu řízení může být dělení do dvou skupin, a to na unipolární a bipolární, viz *obr. 3*.



*Obr. 3 Dělení s řízením motoru v souvislosti s buzením cívek*

Unipolární motor je možno poznat dle počtu vyvedených vodičů, kterých bývá 6 nebo 5. K vlastnímu buzení není potřebné řešit směr proudu cívkami. U bipolárního zapojení jsou vyvedeny 4 vodiče a nabízí se možnost sériového nebo paralelního zapojení. Při potřebě použití menšího krouticího momentu se používají sériová zapojení, při kterých nejsou potřebné ani vysoké proudy.



Obr. 4 Základní možnosti zapojení – (Unipolární, bipolární sériový a bipolární paralelní)

[11] [22]

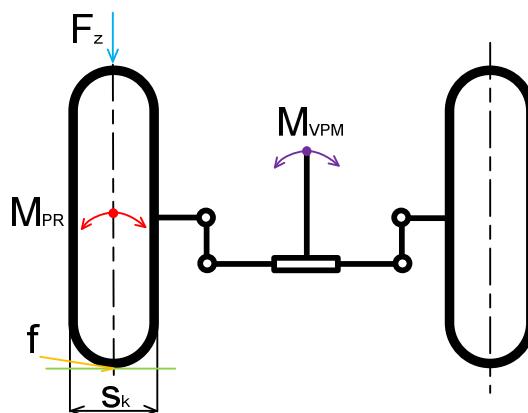
## 1.2 Výpočty pro výběr typu motoru

Při výběru vhodného typu krokového motoru je nutno zohlednit funkce, kterými bude motorek disponovat, a přesné momenty, které bude muset být schopen dodávat. Jelikož se jedná o tovární rám čtyřkolky, který je upraven a uzpůsoben pro vložení elektromotorů k jejímu pohonu, jeví se jako ideální návrh nezasahovat markantně do řízení tím, že by bylo přestavěno (což se zdálo být při prvním pohledu nejlepší variantou), ale stávající konstrukční řešení ponechat. K centrální tyči řízení bude uzpůsobeno lineární vedení s krokovým motorkem. Má-li být proveden požadavek natočení kol o určitý úhel, musí být vypočten přepočet vzdálenosti posuvu použitého lineárního vedení. Motorek tak bude muset vykonat vždy určitý počet otáček, a tím bude zajištěn převod krouticího momentu  $M_k$  na sílu  $F$ . Tento krouticí moment je ovšem nutno vypočíst. Výuková čtyřkolka má přední rovnoběžníkovou nápravu vybavenou nezávislým zavěšením tzv. dvojitými A rameny. Z důvodu dostatečného dimenzování jsou následující výpočty brány z pohledu nejkritičtějšího, a to takovým způsobem, že se kolo otáčí staticky na povrchu podložky. Svislice osy kola je stejná jako osa rejdu. Hmotnost vozidla  $m$  je přibližně 480 Kg. Řiditelná náprava Democarů je osazena koly o rozměrech 26x9-14. [5]

Pro výpočet zatížení jednoho kola platí vztah:

$$F_z = \frac{m \cdot g}{4} = \frac{480 \cdot 9,81}{4} = 1177,2 \text{ N} \quad (4)$$

Z označení pneumatik známe šířku kol v milimetrech, tj. 228,6 mm, a můžeme vypočítat potřebný moment pro otočení jedním kolem. Hodnota součinitele tření je z důvodu dimenzování vyšší.



Obr. 5 Parametry momentu a síly působící na kolo

$$M_{PR} = F_z \cdot f \cdot S_k = 1177,2 \cdot 0,55 \cdot \frac{228,6}{1000} = 148,009 \text{ Nm} \quad (5)$$

Potřebná síla pro centrální tyč v nejkritičtějších bodech řízení se vypočte dle vztahu:

$$F_{TR} = \frac{M_{PR}}{l_{OVL}} = \frac{148,009}{0,1} = 1480,09 \text{ N} \quad (6)$$

Jelikož máme na nápravě kola dvě, bude i potřebná síla dvojnásobná.

$$\begin{aligned} F_{TR} \cdot 2 &= F_{VYS} \\ F_{VYS} &= 2960,18 \text{ N} \end{aligned} \quad (7)$$

Tato vypočtená síla je hodnotou relativní a může se při konečném sestavení lišit.

[21] [10] [3]

### 1.2.1 Volba lineárního vedení

Aby bylo možné po předešlých výpočtech vybrat správný typ krokového motoru, je nutné nejdříve vybrat typ lineárního vedení. Po konzultacích a rozměrových měřeních bylo rozhodnuto pro lineární vedení firmy Kuroda, značené SG3305A-300P, viz obr. 6. Zvolené vedení mojí aplikace má atypický rozměr, tudíž je nutné lineární vedení zakázkově vyrobit. Katalogové informace viz Tab. 1. Šroub vedení je trapézový, ve strojnických tabulkách jej lze nalézt pod názvem lichoběžníkový, upevňovací část příruby má rozteč 47,1x47,1 mm.



Obr. 6 Lineární vedení Kuroda

Tab. 1 Katalogové parametry vedení

Kuroda SG3305A-300P Katalogové listy		Kuroda SG3305A-300P Doplňkové informace	
Rozběhový moment – max. $M_{ROZ}$ [Nm]	0,15	Účinná délka vedení $L_{VED}$ [mm]	300
Stoupání $h$ [mm]	5	Průměr šroubu - Střední $D_{STR}$ [mm]	9,25
Dynamické zatížení vozíků $S_{ZAT}$ [N]	12 600	Průměr šroubu – Malý. $D_{MIN}$ [mm]	8,2
Průměr šroubu $D$ [mm]	10		

[13] [12] [17]

Po zjištění tabulkových hodnot lze bez potíží vypočíst úhel stoupání závitu:

$$\alpha_{sr} = \arctg\left(\frac{h}{\pi \cdot D_{STR}}\right) = \arctg \frac{5}{\pi \cdot 9,25} = 9,76^\circ \quad (8)$$

I výpočet účinnosti šroubového převodu:

$$\eta_{sr} = \frac{\frac{h}{\pi \cdot D_{STR}}}{tg(\alpha_{sr} + \arctg(f))} = \frac{\frac{5}{\pi \cdot 9,25}}{tg(9,76 + \arctg(0,01))} = 0,9436 \quad (9)$$

Přičemž  $f$  je symbol součinitele tření kuličkového závitu, jehož hodnota je 0,01.

Pro výpočet minimálního požadovaného hnacího momentu motorku je použit výše vypočtený parametr síly, přičemž platí:

$$M_{VPM} = \frac{F_{VYS} \cdot h}{2 \cdot \pi \cdot \eta_{sr}} = \frac{2960,18 \cdot 0,005}{2 \cdot \pi \cdot 0,9434} = 2,496 \text{ Nm} \quad (10)$$

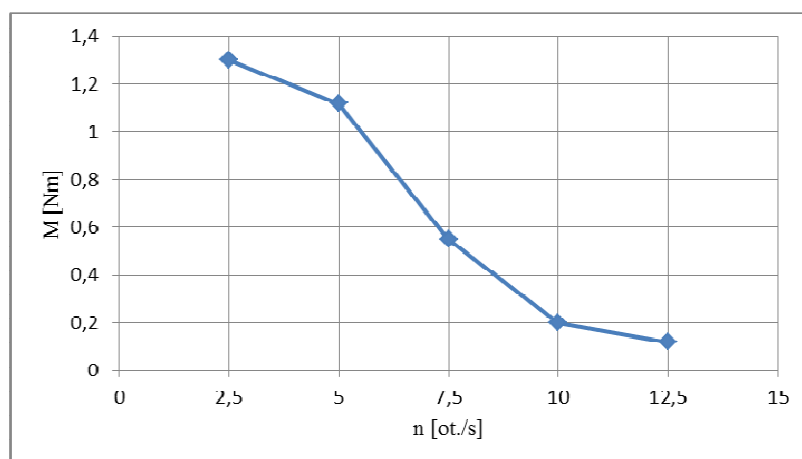
[31] [25]

### 1.2.2 Krokový motor se zpětnou vazbou

Ve světle základního výpočtu hnacího momentu je patrné, že motorek musí být schopen v nejkritičtější situaci vyvinout moment 2,496 Nm. Nejlepší volbou typu motoru je bipolární krokový motorek 5718L-01P, který lze skrze spojku XY25 k lineárnímu vedení připojit. Rozměry uchycení příruby motorku jsou totožné s rozměry lineárního vedení. Je to vůbec nejsilnější vyráběný typ krokového motorku použitelný s možnou korelací se zmíněným vedením. Parametry motoru viz *tab. 2*.

*Tab. 2 Katalogové parametry krokového motoru*

5718L-01P	
Hnací moment motoru $M_{HT}$ [Nm]	2,08
Počet vodičů	4
Proud fází [A]	2,80
Hmotnost [kg]	0,998
Moment setrvačnosti [kg.cm <sup>2</sup> ]	0,4758
Upevňovací část příruby	47,1x47,1
Úhel motoru [°/krok]	1,8

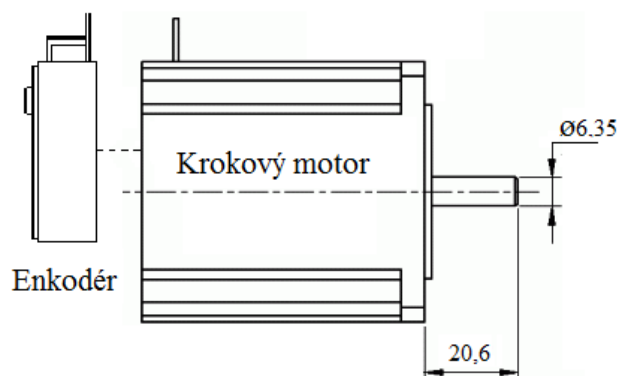


*Obr. 7 Momentově rychlostní křivka krokového motoru 5718L – 01P*

[23]

Z uvedených nejdůležitějších parametrů zobrazených v tab. 2 je třeba zdůraznit informaci uvedenou na prvním řádku tabulky, tedy že motor má hnací moment o 0,416 Nm menší, než je požadovaný vypočtený moment. Tato difference je zapříčiněná volbou kritických početních parametrů, tj. hmotnosti vozidla, koeficientu tření, typu pneumatiky a natáčení kol kolem své osy. Početní parametry jsou ve skutečnosti příznivější, a tím pádem potlačují vypočtený rozdíl momentů. Dalším možným nástrojem ke snížení požadovaného krouticího momentu je parametr označený v úvodních výpočtech jako  $l_{OVL}$  což je délka ramene natáčecího mechanismu viz níže kapitola.

Na obr. 7 je vykreslena momentově rychlostní křivka, ze které je patrný fakt, že při rostoucích otáčkách klesá moment. Motor má úhel kroku  $1,8^\circ$ , což znamená, že je potřebných 200 kroků k provedení jedné otáčky. Jedná se o dvoufázový krokový motor napájený skrze kontrolér R356 s možností připojení optického enkodéru. Enkodér je umístěn ze zadní strany motoru a připevněn tak, že jeho pracovní část zaznamenává rotující pohyb hřídele, viz obr. 8. Tímto způsobem je zajištěna zpětná vazba o aktuální informaci úhlu natočení hřídele krokového motoru.



Obr. 8 Zpětná vazba ve spojení s motorem

Tab. 3 Enkodér US DIGITAL

Enkodér		Kontrolér	
Bílá	Kanál A	Modrá	Kanál A
Hnědá	Kanál B	Žlutá	Kanál B
Zelená	Přiřazení	Bílá	Přiřazení
Červená	+5 VDC	Červená	+5 VDC
Černá	GND	Zelená	GND

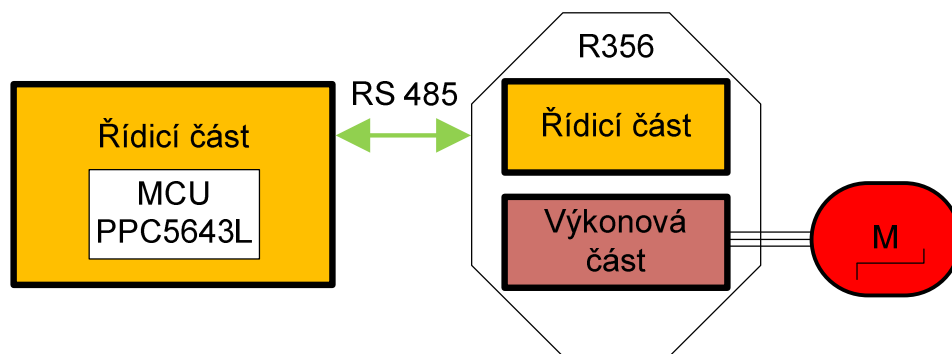
Po uchycení zpětné vazby s motorem a následnému pětivodičovému propojení s kontrolérem viz *tab. 3* je nezbytné pro kontrolér provést přepočítání pulzů podle vzorce:

$$KE = \frac{Km \cdot Po}{Er \cdot 4} \cdot 1000 = \frac{256 \cdot 200}{400 \cdot 4} \cdot 1000 = 32000 \quad (11)$$

Vypočtenou hodnotu je nutno nainicializovat kontroléru. Možností provedení je hned několik, pro naše potřeby a díky vytváření programu v CodeWarrioru se jeví jako nejlepší varianta inicializace prostřednictvím předem stanovených příkazů. Nadefinování, resp. inicializace se stanoví kontroléru příkazem /1aE s dodatkem vypočtené hodnoty. Nutno podotknout, že je zpětná vazba kontroléru skrze enkodér využívána pouze v aktivním modu. Veškeré použité příkazy pro zpětnou vazbu, ale i pro samotný kontrolér, jsou brány z pdf seznamu příkazů pro R356, viz seznam použité literatury. [20]

### 1.3 Návrh struktury elektroniky servořízení

Výkonová část řídicí jednotky je tvořena koncovým stupněm měniče krokového motoru R356, viz *obr. 9*.



*Obr. 9 Znáznornění struktury elektroniky*

### 1.4 Měnič krokového motoru

Jako ovladač zvoleného motoru byl vybrán kontrolér RMS TECHNOLOGIES R356. Teoreticky se dá tvrdit, že se jedná o speciální elektronický obvod vytvářející impulsy stanovené délky a pořadí. Díky impulsům ve spojení s výkonovou částí je zajištěno buzení vinutí rotoru. A skrze frekvenci, délky či pořadí jednotlivých impulsů je řízen charakter otáčení rotoru motorku. Veškeré důležité parametry a specifikace jsou uvedeny v *tab. 4*.





Obr. 10 Výkonová část – kontrolér R356

#### 1.4.1 Parametry měniče

Tab. 4 Parametry měniče krokového motoru

Defaultní nastavení		Elektrické parametry	
Napájecí proud [A]	25% z 3A	Napájení [V DC]	+12 – 40
Přidržený proud [A]	10% z napájecího	Fázový proud [A]	0,3 - 3
Výstupy	vypnuté	Počet vstupů/výstupu	4
Krokování	256x	Proud vstupu [mA]	700
Přenosová rychlost [bps]	9600	Pull – up rezistor [kΩ]	20
Maximální rychlost [pps]	305175		

Dodatek Tab. 4 Parametry měniče krokového motoru

Vlastnosti		Komunikační nastavení	
Mikrokroky	1,2,4,8,16,32, 64,128,256	Přenosová rychlost [bps]	9600, 19200,38400
Teplotní rozsah [°C]	-20 až 70	Parita	Není
Provozní teplotní rozsah [°C]	0 až 50	Stop bit	1
Pulzní frekvence max. [MHz]	16,7	Datový bit	8

Na obr. 10 je zobrazen zmíněný kontrolér, který obsahuje tři konektory. Propojení prvního konektoru je objasněno v tab. 3, spojení kontroléru s enkodérem. Druhý konektor je čtyřvodičově spojen přímo s motorem, propojení vodičů objasněno v tab. 5. A poslední

konektor, 15 pinový, je použit z důvodu připojení napájení, komunikačních rozhraní a jednotlivých vstupů a výstupů, což mohou to být tlačítka, senzory atd., viz *tab. 6*.

*Tab. 5 Propojení kontroléru s motorem*

<b>Připojení</b>	A + Fáze	B + Fáze	A - Fáze	B - Fáze
<b>Vodič</b>	Červený	Modrý	Zelený	Černý

*Tab. 6 Připojení vodičů a jejich specifikace*

<b>Označení</b>	<b>Vodič</b>	<b>Fyzický název</b>
1	zelený	Napájení – (zemnění)
2	žlutý	Zap/Vyp – výstup 1A
3	zelený	Vstupní veličina směru
4	žlutý	+5V Vstupní hodnota optického snímače
5	modrý	Vstupní veličina
6	bílý	Napájecí vstup optického snímače
7	červený	Vstupní veličina optického snímače
8	červený	Sériová linka RS 485A+
9	červený	Napájení, vstup (+12 – 40 V)
10	modrý	Zap/Vyp – výstup 1A
11	bílý	Vstupní veličina pro řízení kroku
12	červený	Signálové uzemnění
13	žlutý	Vstupní veličina
14	modrý	Vstupní veličina
15	bílý	Sériová linka RS 485B-

[16]

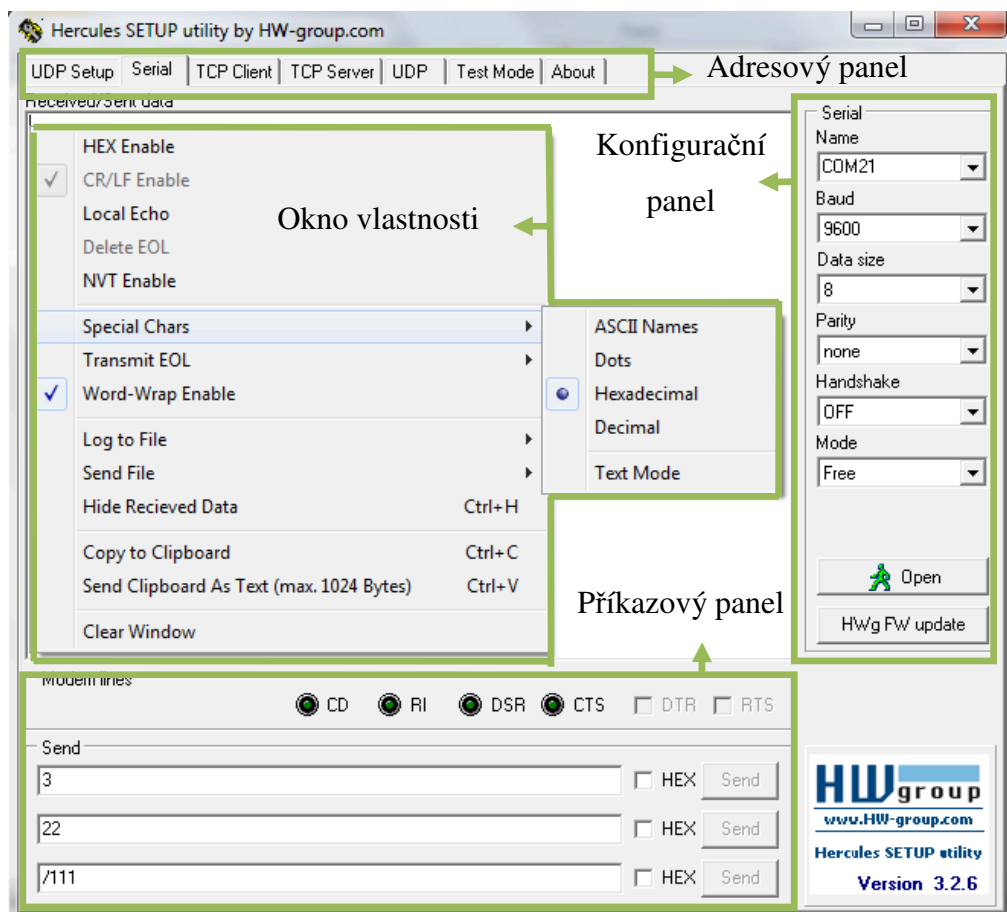
### 1.4.2 Možnosti zasílání příkazů kontroléru

Kontrolér je složen z řídicí a výkonové části, je možné ho propojit se zmíněným nadřazeným řídicím systémem, Tower systémem PXS 20, nebo přímo s PC skrze USB převodníkovou kartu. Při propojení USB převodníkové karty s kontrolérem je nutné zadávat příkazy skrze tzv. terminál. Příkazy mohou být relativně jednoduché, ale je umožněno zasílání i složitějších příkazů (nutnost použití smyček).

Druhů softwarových terminálů je hned několik, ty lze většinou zdarma stáhnout na stránkách výrobce daných ovladačů. Použití více typů terminálů se velmi osvědčilo z důvodu větších možností nastavování parametrů. Jako příklad bych uvedl tři vyzkoušené typy.

Prvním byl software LinControl 1.2, oproti následujícím dvěma je velice dobrý v tom, že umožňuje získávání informací díky dotazovým panelům. Nastává možnost zjištění např. aktuálního rychlostního režimu, maximální rychlosti otáčení, nastavení polohy rotoru do „home polohy“ atd.

Druhým odzkoušeným programem byl program T-link, který už neumožňuje primární nastavení, ale používá se spíše jako monitorovací software. Posledním použitým prostředím byl tzv. Hercules, také oproti programu LinControl nebylo umožněno nastavení mnoha primárních úkonů, ovšem všechny potřebné základní, jinak inicializační funkce, jako je nastavení přenosové rychlosti atd. jsou samozřejmostí – viz konfigurační panel zobrazený na *obr 11*. Obrovskou výhodou tohoto softwaru oproti předchozím zmíněným je zobrazení odeslaných či přijatých znaků kontroléru více možnostmi. Bylo umožněno příkaz pro otočení doleva o jeden krok zobrazit s jinak skrytými znaky, a tak vyhodnotit, jsou-li např. výrobcem požadované stanovené ukončovací znaky nadefinovány správně. Na *obr. 9* je vyzdvihnuto jedno ze zmíněných prostředí – Hercules.



Obr. 11 Terminál Hercules

Při druhém zmíněném způsobu ovládání motorku tj. skrze vývojový kit tzv. Tower systém se příkazy a veškeré parametry zapisují pomocí programovacího jazyka a programu CodeWarrior do procesoru systému, tím je umožněno provádění požadované funkce, viz níže text. [14] [7]

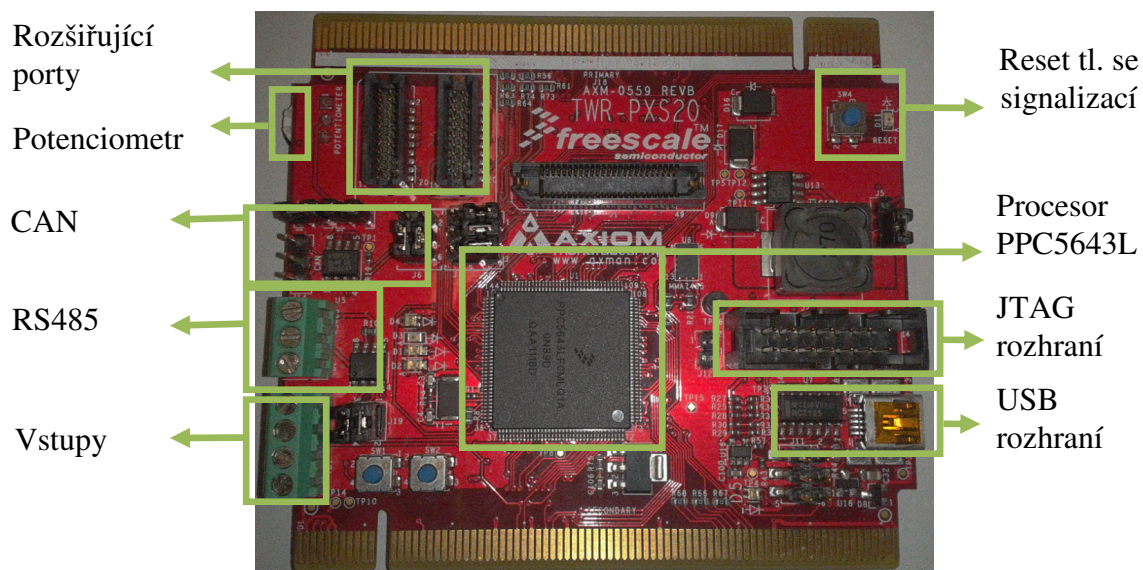
## 1.5 Řídící část aplikace

V této kapitole bude nejprve popsán již výše zmíněný vývojový kit Tower systém PXS 20, který s řídicím stupněm kontroléru tvoří celkovou koncepci řídicí části navržené aplikace. Obrovskou výhodou Tower systému je mnohostrannost, kterou firma Freescale tímto produktem nabízí. Jako u většiny procesorových systémů jsou umožněny velice efektivní konfigurace z hlediska softwarových uzpůsobení a oproti dalším typům je možné hardwarové přizpůsobování, rozšiřování a úpravy s dalšími systémy. Následně bude v kapitole popsán použitý operační systém.

### 1.5.1 Tower systém PXS20

Srdcem zmíněného systému je mikroprocesorový obvod PPC5643L, který je 32 bitový. Pracuje s velmi vysokými frekvencemi, až 120 Mhz, a umožňuje připojení relativně velkého množství periférii. Pro vytvářenou aplikaci řízení patří mezi nejdůležitější řadiče sběrnice CAN a sériové linky UART, samozřejmě jsou různé převodníky, připojovací rozhraní atd., viz *obr 12*. Parametry vývojového kitu jsou zobrazeny v *tab. 7*.

Vývojový kit lze napájet skrze USB konektor resp. USB rozhraní nebo 5 V externím zdrojem. Naprogramovaná data resp. program se nahrává JTAG programátorem (velmi rychlý) nebo lze využít o něco pomalejší USB rozhraní.



*Obr. 12 Tower systém PXS20 – vývojový KIT*

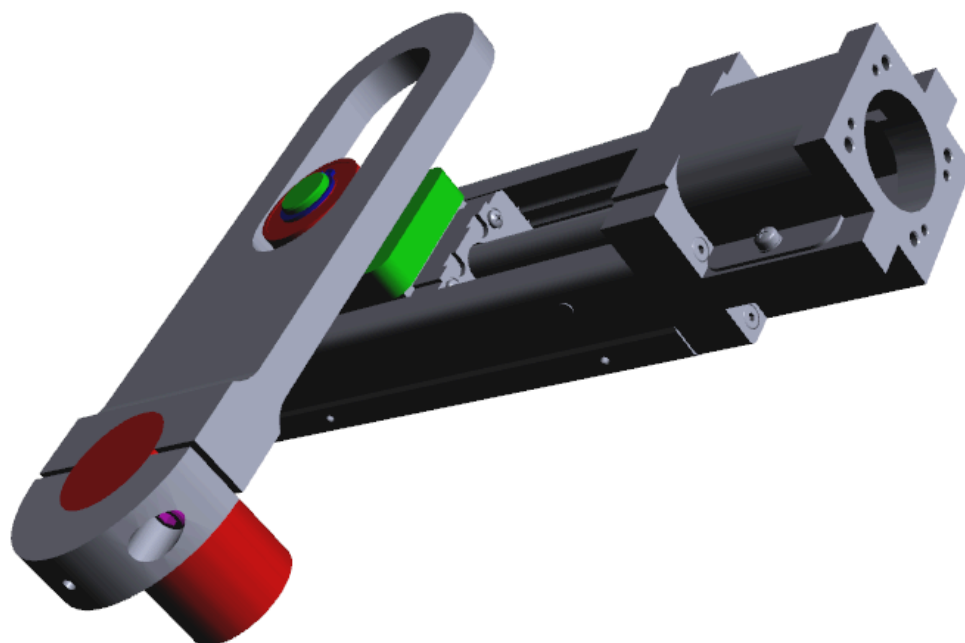
Tab. 7 Parametry vývojového kitu PXS20

<b>CPU</b>	Jádro – duální	E200z4
	Frekvence jádra [Mhz]	120
	Výkon [MIPS]	240
<b>Paměti</b>	Flash paměť [MB]	1
	Čipová SRAM [KB]	128
<b>Sběrnice jádra</b>	Adresování/Data [bit]	32/64
<b>Sběrnice periférií</b>	Adresování/Data [bit]	32/32
<b>Napájení</b>	Digit./Analog./Referen. [V]	3,3/30-3,6/4,5-5,5
<b>Segmenty</b>	Kontrolér přerušení	16-ti úrovňový
	eDMA kontrolér přerušení	16-ti kanálový
	Časové moduly	až 4 kanálový
	CRC,PM,CM jednotky	
	ADC převodník	2 x 12 bitový
<b>Komunikační rozhraní</b>	LinFlex kanál	2 x
	SPI	3 x s aut. chip selekt gener.
	CAN	2 x
	FlexRay modul [Mbit/s]	až 10

[26] [4] [29]

## 1.6 Návrh spojení lineárního vedení a hlavní řídicí tyče

Samotné propojení musí být zrealizováno mechanismem, který je pevně spojen s hlavní řídicí tyčí řízení a samozřejmě i vedením. Skrze toto propojení bude umožněno převedení translační pohybu na rotační. Pro tento účel byl navržen a zkonstruován speciální natáčecí mechanismus, vyrobený z konstrukční ocele 11 523, viz *obr. 13*.



*Obr. 13 Model natáčecího mechanismu*

Mechanismus je vyroben ze tří komponent, třmene, ovládacího ramene (vedení) a jezdce. Jezdec je příslušnými šrouby uchycen k lineárnímu vedení a je na něj nalisováno ložisko 6002-2RSH. Třmen a ovládací rameno upínají hlavní řídicí tyč a části s vyřezaným otvorem jsou vsunuty na ložisko jezdce. V klidové poloze, tj. při nulovém požadovaném úhlu natočení kol, má vedení nejkratší délku ramene. Z této polohy je potřebný největší moment motorku.

Mezi ložiskem a ovládacím ramenem musí z principu být malá vůle - 0,1 mm. Vlivem vyfrézovaného otvoru ramene je zavedena mírná nelinearita. Délka natáčecího mechanismu i s pracovní částí musí být v poměru s délkou lineárního vedení. Výrobní výkres natáčecího mechanismu uveden v příloze A.

## 2 Praktická realizace

V určitých fázích ladění aplikace softwaru byl z důvodu univerzálnosti použit vývojový kit PXS 20. Finální verze využívá níže popsanou navrženou elektronickou jednotku. Dále budou v kapitole uvedeny jednotlivé dílčí přepočty požadovaného úhlu v závislosti na natáčení kol na nápravě. Díky těmto přepočtům je možné vytvořit vývojové diagramy sloužící k naprogramování celé aplikace.

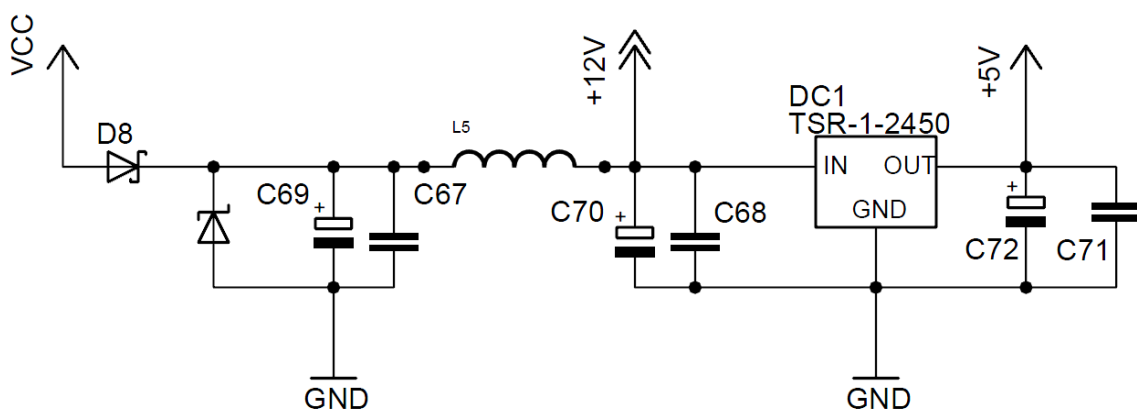
### 2.1 Návrh vlastní jednotky

Jelikož se vývojový kit ve spojení s procesorem projevil při programování a ladění aplikace jako velice dobrá realizační varianta, bylo rozhodnuto při návrhu vlastní desky o zachování totožného procesoru. Tudíž je opět použit dvoujádrový 32 bitový procesor založený na principu hardwarské architektury, parametry viz *tab. 7*. Značná část součástek elektronických obvodů je vyrobená SMD technologií z důvodu snadné implementace. Aby se celý návrh nevymykal myšlence, že bude jednotka použita v laboratorním vozidle, nebyl opomenut ani připojovací konektor používaný v automobilovém průmyslu.

Pro samotné napájení jednotlivých komponentů je nezbytnou součástí návrh napájecího obvodu. Srdcem tohoto obvodu je DC/DC konvertor TSR-1-2450, který vlivem vysoké účinnosti (až 96 %) umožňuje velké provozní zatěžování, a to až k teplotám +60 °C bez nutnosti použití chladičů. Mezi jeho charakteristické vlastnosti patří například nízký klidový proud 2 mA, velká přesnost výstupu  $\pm 2 \%$  a nízké pohotovostní napájení. Klasické kondenzátory slouží s cívkou v obvodu k omezení rušení a elektrolytické jsou použity pro vyrovnaní kolísání napájecího napětí. Charakteristika cívky L3 je v případě impedance na frekvenci v celém rozsahu lineárně rostoucí. Je složena z feritového jádra a jmenovitý proud je v rozsahu od 0,16 do 3,45 A. Cívky tohoto typu jsou konstruovány do teplot až 150 °C. Cívka se dá označit filtrační tlumivkou, která chrání veškerá spínání. Negativní vlastností je možný vznik přepětí, jelikož tato cívka derivuje proud na napětí. Na vstupu obvodu nejsou opomenuty diodové ochrany, viz *obr. 14*.

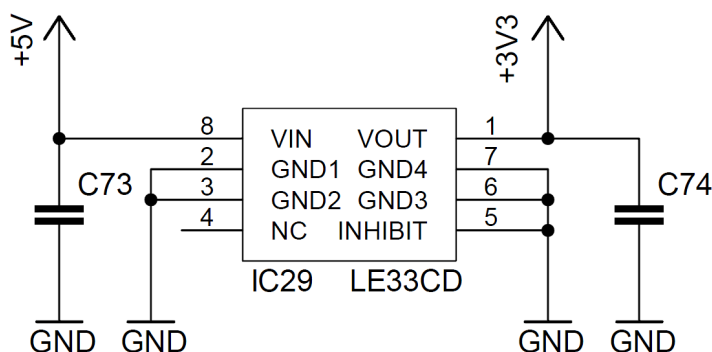
[28] [30] [2]





Obr. 14 Obvod napájení

Jelikož je procesor napájen stanoveným napětím o velikosti 3,3 V, je nutné navrhnout obvod, který bude obsahovat regulátor. Obvod LE33CD s variabilním výstupním napětím v rozmezí od 2 přes potřebné 3,3 až k 8 V se jeví jako nejlepší varianta. Jedná se lineární SMD regulátor, jehož úbytek napětí je velice nízký, činí 0,2 V a klidový proud vykazuje taktéž nízký charakter. Samozřejmě jsou k příslušným pinům přivedeny kondenzátory patřičných kapacit z důvodu blokování rušení signálů, viz obr. 15. [24]



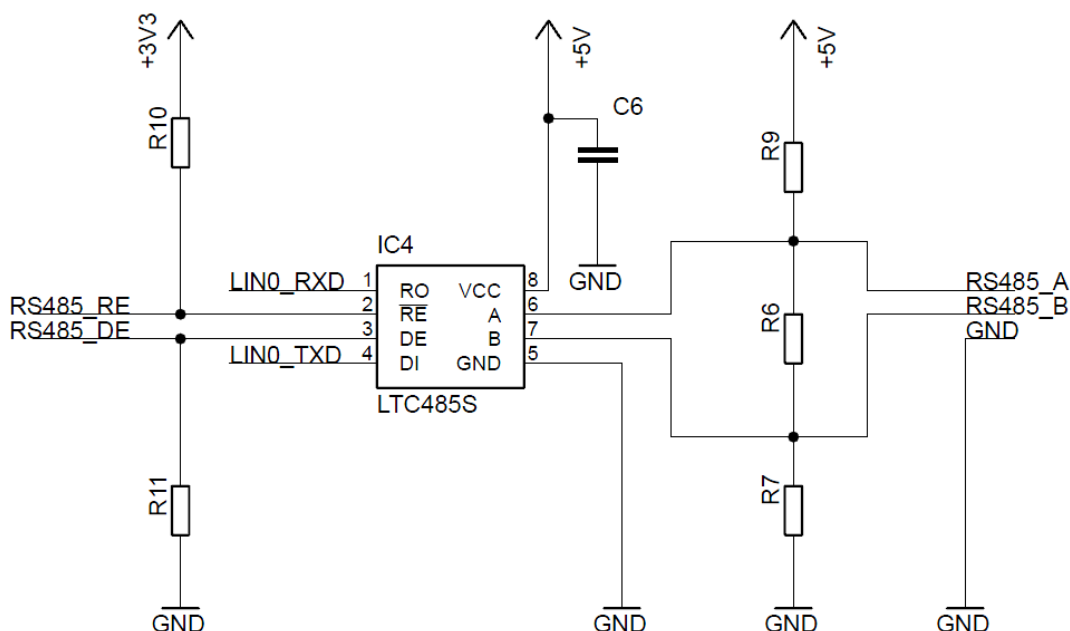
Obr. 15 Obvod regulující napětí

Dalším nezbytným obvodem celé aplikace musí být obvod s převodníkem realizující komunikaci RS 485. Z obr. 1. je totiž patrné, že kontrolér je spojen s jednotkou právě skrze tuto sériovou linku. Při samotném návrhu hraje nejdůležitější roli obvod LTC485S, který je napájen 5 V DC. Komunikace je aktivována v části modulu pro příjem pin 2 nebo pro vysílání pin 3, které jsou dále přivedeny na ovládací vstupy samotného procesoru. Kanály příjmu a odesílání dat jsou přivedeny rovněž k příslušným pinům, pin 1 a 4.

K hlavním parametrům obvodu převodníku se řadí nízká spotřeba 300  $\mu$ A, tepelná ochrana a např. typická 70 mV vstupní hystereze. Z důvodu eliminace nejrušnějších odrazů zpráv je v navrženém schématu použit ukončovací odpor R6. Odpory R7 a R9 jsou

navrženy tak, aby měly rozdílné hodnoty odporu. Tento návrh je nutný z hlediska získání informací o úrovních jednotlivých vodičů v souvislosti se zabezpečením nechtěného indukovaní šumu. Celkové schéma návrhu tohoto dílčího obvodu znázorněno na *obr. 16*.

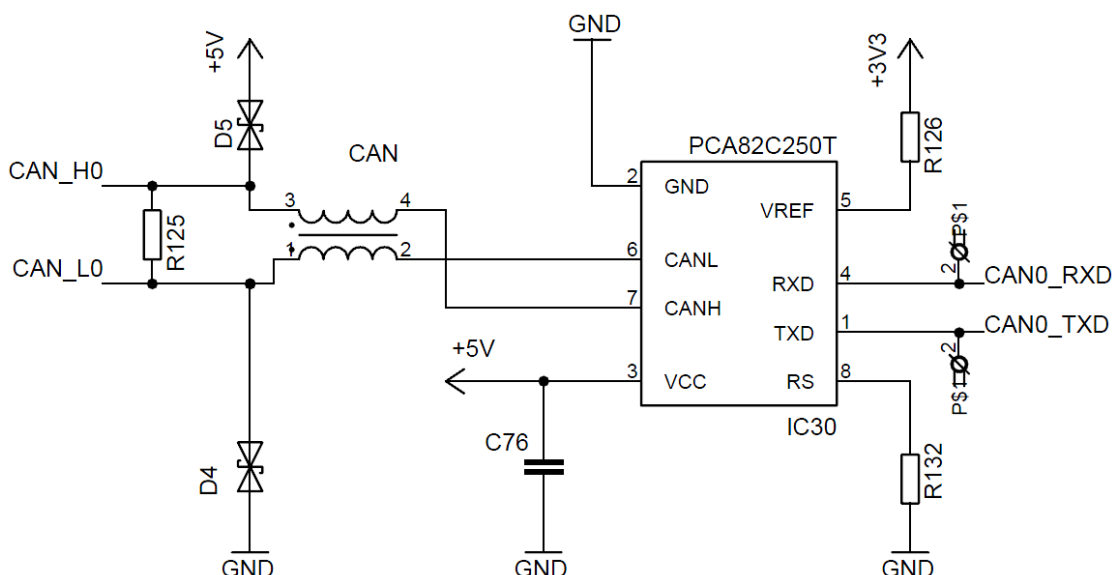
[15]



Obr. 16 Návrh obvodu pro RS485

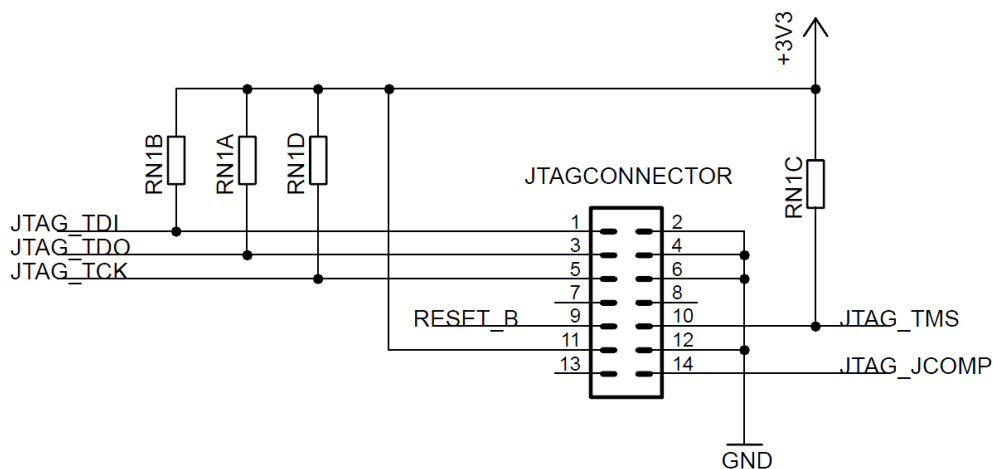
Jelikož všechny řídicí jednotky ve vozidle Democar navzájem komunikují, je kladen značný důraz na parametr rychlosti komunikace. Jako jednoznačná volba se jeví sběrnice CAN, která v dnešní době bývá nejčastěji využívaným rozhraním automobilového průmyslu. Vyhovuje tedy nejen zmíněnou rychlostí, která dosahuje až 1 Mbit/s, ale také spolehlivostí a snadnou rozšiřitelností. Hlavní částí obvodového schématu koncepce CAN, je budič sběrnice PCA82C250T. Do hlavních katalogových údajů patří: Napájecí napětí od 4,5-5,5 V, napájecí proud max. 170  $\mu$ A, diferenciální napětí od 1,5-3 V, zpoždění 50 ns a pracovní teplota od -40 do +125  $^{\circ}$ C. Koncepce obvodu zabezpečuje ochranu před přechodovými jevy, zajišťuje odolnost proti elektromagnetickému rušení, nízkému proudu v pohotovostním režimu a chrání proti zkratu. Dále jsou navrženy patřičné a nezbytné kondenzátory s odpory. Nezbytnou součástí koncepce dílčího schématu CAN jsou obousměrné transily paralelně připojené k lince CAN High a CAN Low. Vyznačují se následujícími parametry: Rychlá doba odezvy, 600 W špičkový výkon a variabilní standoff napětí 5-170 V. Používají se jako ochranné prvky. Odpor R125 připojený mezi zmíněné vodiče je ukončovacím odporem viz *obr. 17*. Obvod je v celkové koncepci návrhu použit dvakrát.

[19] [1]



Obr. 17 Návrh obvodu „CAN“

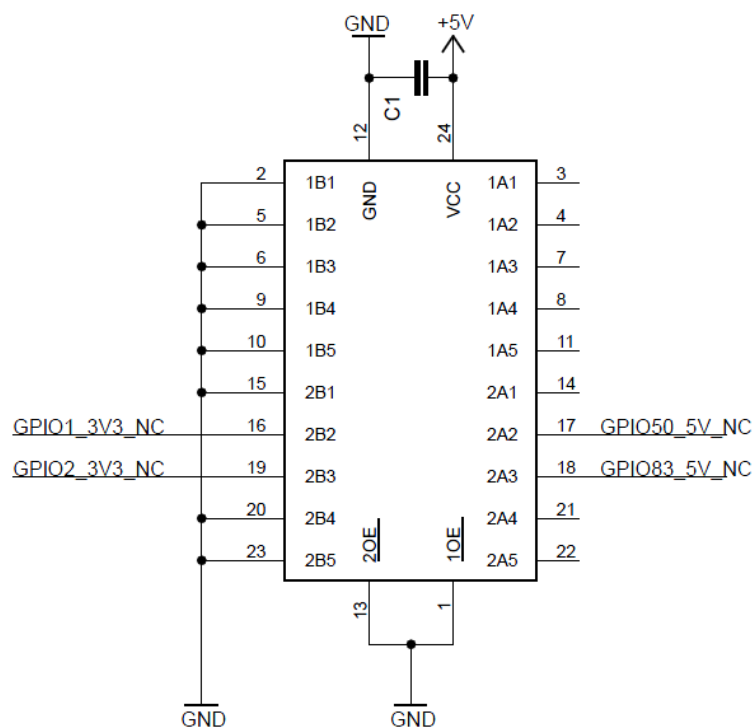
Koncepce navržené řídicí jednotky bude obsahovat také 14ti pinový konektor JTAG, kterým je umožněno nahrání vytvořeného softwaru. Z obr. 18 je patrné přivedení patřičné úrovně napětí k jednotlivým pinům a také připojení zemění. [9]



Obr. 18 Návrh obvodu JTAG konektoru

Následující typ integrovaného obvodu koncepce řídicí jednotky je obvod SN74CBTD3384C vyobrazený na obr. 19 - vysokorychlostní sběrníkový spínač s nízkým stavem odporu. Používá se jako převodník z 5 na 3,3 V úrovně. Poskytuje ochranu vůči podkmitům a zajišťuje setrvání ve správném stavu. V jeho struktuře je v sérii se vstupem VCC zakomponovaná dioda. Integrovaná funkce loff, zajišťuje, že při vypnutém zařízení neprotéká obvodem škodlivý proud. Mezi vstup a zem je přiveden blokovací kondenzátor.

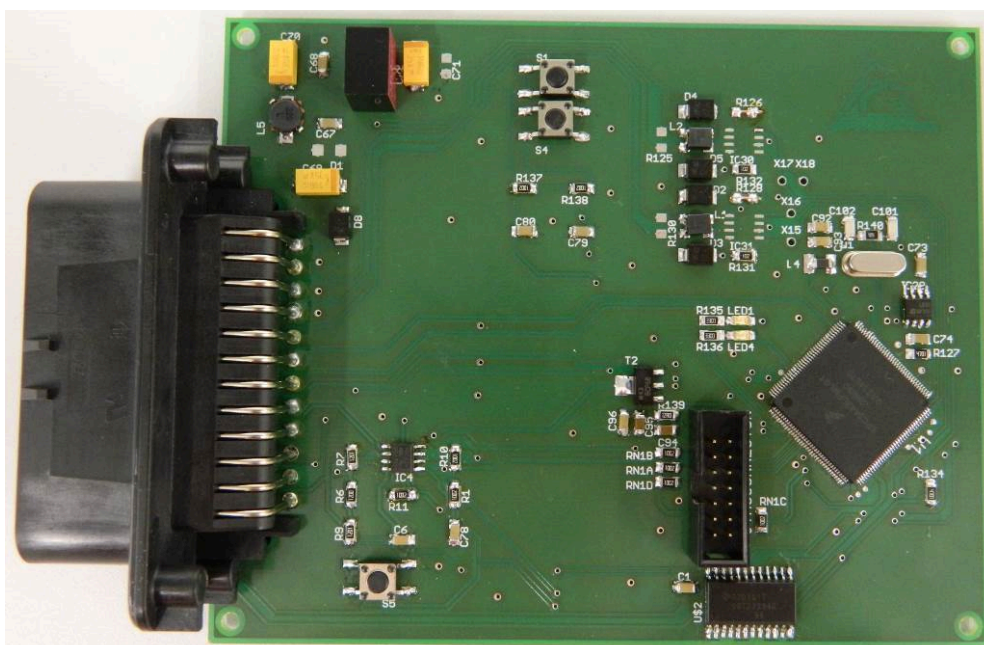
[27]



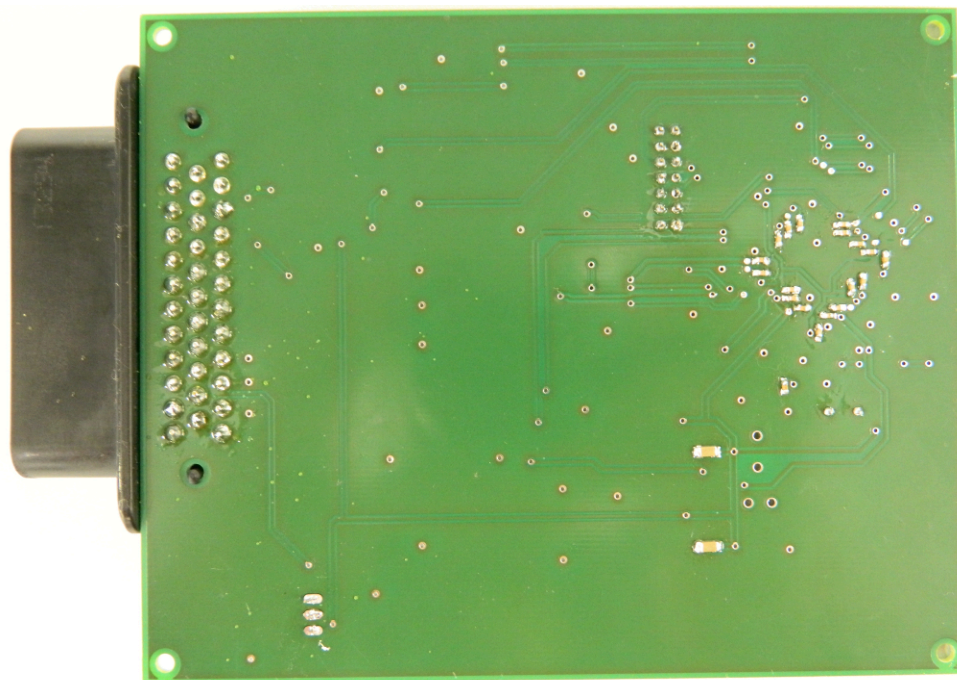
Obr. 19 Převodník

Koncepce návrhu řídicí jednotky obsahuje dále obvody s programovatelnými tlačítky, restartem mikrokontroléru a zapojení signalizačních diod.

SCU je fyzicky zobrazena na obr. 20, 21. Osazovací plán viz příloha B.



Obr. 20 Vrchní strana jednotky SCU – TOP

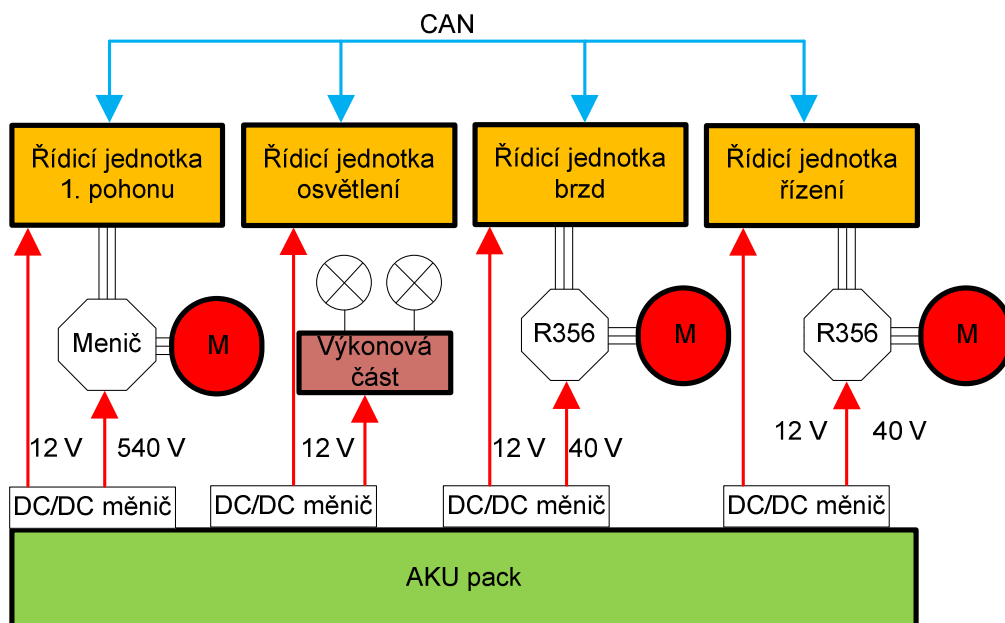


*Obr. 21 Spodní strana jednotky SCU – BOTTOM*

Napájecí cesty jsou široké 0,6096 mm, cesty vedoucí přímo do procesoru 0,254 mm. Všem ostatním byla nadefinovaná šířka 0,4064 mm.

## **2.2 Začlenění realizovaného systému do struktury**

Rámová konstrukce vozidla Democar je vyrobena z továrního čtyřkolového vozidla GOES 625i. Výukové vozidlo není poháněno spalovacím motorem, ale dvěma a v budoucnu čtyřmi na sobě nezávislými elektromotory uchycenými skrze spojky a úhlové převodky k jednotlivým kolům. Trojfázové synchronní motory firmy Baumüller o maximálním krouticím momentu 43,5 Nm s rozsahem otáček 0-1000 ot/min se starají ve spolupráci s měničem opohon vozidla. Měníče je možné rozšířit o komunikační rozhraní RS232, resp. CANOpen. Pohon jako takový umožňuje režim brždění. Z důvodů bezpečnosti byl vyvinut nezávislý systém ovládání brzd řízený krokovým motorem, jehož úkolem je zabezpečit situace dobrždování a funkci parkovací brzdy. Další aktivní aplikací je aplikace řízení skládající se z krokového motoru a jeho elektronické částí, kde pro měnič s motorem je zapotřebí 40 V a pro ŘJ 12 V napájení. Do struktury vozidla byl dále navržen systém osvětlení napomáhající pasivní bezpečnosti. Potřebná napájecí soustava pro dané celky je zrealizována skrze tzv. AKU pack, který je složen z 200 lithium-ferit-fosfátových článků, viz *obr. 22*. Jednotlivé systémy jsou napájeny skrze DC/DC měniče.



Obr. 22 Schéma napájení komponent a systémů

Jednotky samotných systémů jsou propojeny CAN sběrnici. Každá jednotka má nadefinováno své ID. Jednotka komunikace ID=100 (120), jednotka pohonu ID=300, jednotka brzd ID=600 jednotka řízení 800 (900) jednotka osvětlení ID=1000. Příkazy jednotlivých zpráv jsou zasílány v bajtech datových rámců, každý bajt je stanoven pro určitou funkci.

## 2.3 Vývoj aplikačního software

### 2.3.1 Operační systém

Pro snadnější práci s vybraným MCU bylo zvoleno využití operačního systému. Vhodnou variantou je OS vyvíjený stejnou společností jako samotný MCU. Operační systém MQX je systémem reálného času, není ovšem klasickým systémem. Runtime knihovny tohoto systému obsahují předdefinované funkce, které může programátorem vytvořená aplikace používat. Programátor se nemusí zabývat ovládáním vstupů a výstupu, správou paměti, nastavováním bitů jednotlivých registrů, hardwarového přerušování atd. Nadto může psát program ve vyšším programovacím jazyce jako je např. C. Nastává možnost běhu více funkcí zároveň, ovšem za předpokladu dělení pracovního času procesoru. Tento popsaný RTOS je složen primárně z komponent **jádra** a dalších **doplňkových komponent**.

Hlavní a velice významnou částí jádra je část pro inicializaci. Postupně jsou také spouštěny tzv. tasky (úlohy), které jsou předem v inicializaci deklarovány, jako autostart. Bez samotné inicializace nedochází ke spuštění MQX. Při inicializaci je kladen důraz např. na tyto body: inicializace hardware, uvolnění časovačů, zahájení plánování atd.

Do komponent jádra spadá i řízení úloh. Automaticky spuštěné úlohy mají možnost komplexně spravovat další úlohy běžícího programu po spuštění MQX. Atributy jednotlivých úloh lze variabilně za běhu měnit. Po ukončení úloh dochází k uvolnění paměti.

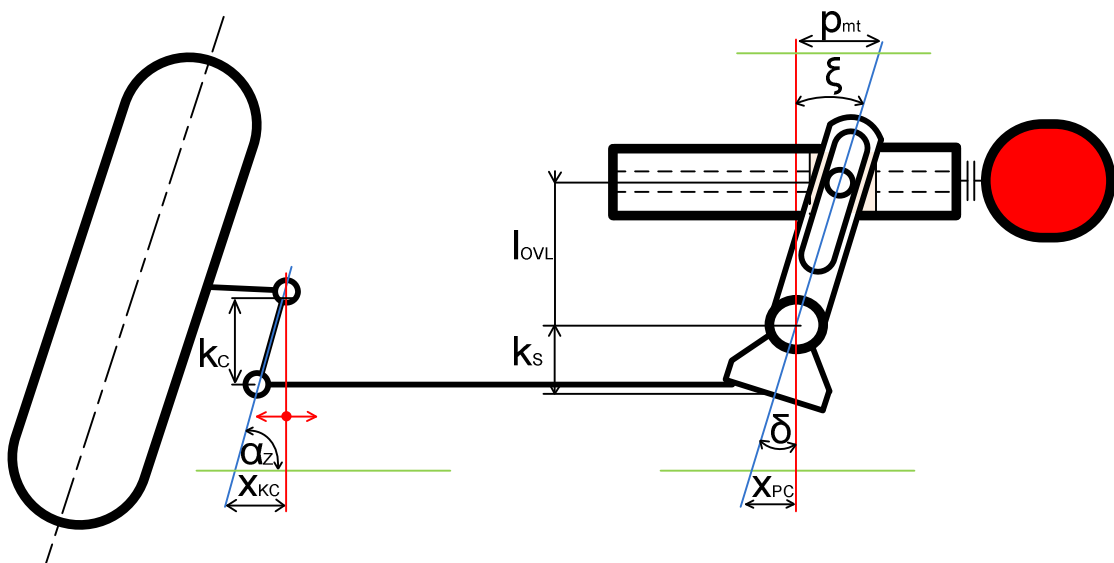
Poslední komponentou jádra je plánování, které může být rozděleno na FIFO, RR (Round robin) a otevřené plánování. Každá ze zmíněných skupin je rozdělena dle priorit.

Do již zmíněných doplňkových komponent patří události. Jsou zavedeny z důvodu podpory správy objektů formátovaných do bitových polí. Dále to mohou být semaforey sloužící k synchronizaci jednotlivých úloh nebo k dědění priorit. Zprávy, jako doplňkové komponenty, zajišťují, aby byla možná komunikace mezi jednotlivými úlohami. Nejsou opomenuty ani čas a časovače, softwarové hlídání, přerušení a koneckonců i záznamy. K programování je použit software CodeWarrior. [18]

### **2.3.2 Výpočty pro softwarovou implementaci**

Z *obr. 1* je patrné, že aktuální požadované informace o úhlu natočení budou z vysílacího přijaty přijímacím modulem a dále skrze CAN sběrnici předány do SCU. Ta patřičným příkazem odešle kontroléru přes sériovou linku RS485 informaci o kolik kroků a jakým směrem se má hřídel krokového motoru pootočit. Aby byl vykonán adekvátní počet kroků, je nutný přepočet úhlu natočení vůči vzdálenosti posuvu lineárního vedení. Na *obr 23* jsou parametry přepočtu znázorněny.





Obr. 23 Koncepte levé části řízení s uvedením parametrů – pohled ze shora

V následující textové části je uveden příklad přepočtu požadovaného úhlu natočení např.  $\alpha_z=30^\circ$  v souvislosti k posuvu lineárního vedení, přičemž parametr vzdálenosti natáčecího ramene kola  $k_C$  je neměnný, jeho hodnota je 80 mm. Pak platí:

$$x_{KC} = \sin \alpha_z \cdot k_C = \sin(30) \cdot 80 = 40 \text{ mm} \quad (12)$$

Délka posuvu vzdáleností  $x_{KC}$  je totožná s délkou posunutí vzdálenosti označené jako  $x_{PC}$ . Segment sloužící jako natáčecí rameno má účinnou délku stanovenou uchycením jednotlivých komponent z jedné a druhé strany  $k_s = 50$  mm. K přepočtu úhlu  $\delta$  platí následující vztah:

$$\delta = \arcsin\left(\frac{x_{PC}}{k_s}\right) = \arcsin\left(\frac{40}{50}\right) = 53,130^\circ \quad (13)$$

Úhel  $\delta$  je totožný s úhlem natočení  $\xi$ , celková komponenta natáčecího mechanismu je uchycena tak, že nejmenší délka ovládacího ramene je 100 mm. Výřez ramene udává jistou nelinearitu, ale je velkým pomocníkem při zvyšujícím se požadovaném úhlu, a tedy i vzdálenosti natočení, kdy s rostoucí vzdáleností klesá potřebná síla natáčení. Pro přepočet na vzdálenost posuvu vedení platí:

$$p_{LV} = \sin \xi \cdot l_{OVL} = \sin(53,130) \cdot 100 = 80 \text{ mm} \quad (14)$$

Z výpočtu je tedy patrné, že „plovoucí“ část vedení musí z jeho středu (tj. z  $0^\circ$ ) při požadavku úhlu  $30^\circ$  ujet vzdálenost 80 mm. V tab. 1 vidíme, že lineární vedení má stoupání  $h=5$  mm. Z toho plyne přepočet:



$$p_{OTM} = \frac{p_{LV}}{h} = \frac{80}{5} = 16 \text{ ot} \quad (15)$$

Motorek musí tedy vykonat 16 otáček. Mikrokrokování je z důvodu citlivosti nastavené na hodnotu  $K_m=256$  krát a k vykonání jedné otáčky je potřebných  $P_o=200$  kroků. To znamená, že je fyzicky potřebných 51200 pulzů. Je-li touto hodnotou násoben předchozí výpočet, pak dostáváme:

$$m_f = p_{OTM} \cdot 51200 = 16 \cdot 51200 = 819200 \quad (16)$$

Při zadání této hodnoty kontroléru motorku s uvedením neodlučitelných znaků by se hřídel rotoru natočila právě tak, aby se kola přední nápravy vozidla Democar otočila o  $30^\circ$ .

Samozřejmě, že se do zdrojového kódu může jednotlivě zapsat uvedený postup přepočtení úhlu na počet kroků motoru. Rovněž lze následujícím výpočtem koeficientu odlehčit paměť procesoru:

$$k_A = \frac{\frac{p_{LV}}{\alpha_z}}{h} \cdot K_m \cdot P_o = \frac{\frac{80}{30}}{5} \cdot 256 \cdot 200 = 27306,667 \quad (17)$$

$$m_{FK} = k_A \cdot \alpha_z = 27306,667 \cdot 30 = 819200 \quad (18)$$

### 2.3.3 Vlastní popis vyvíjeného softwaru

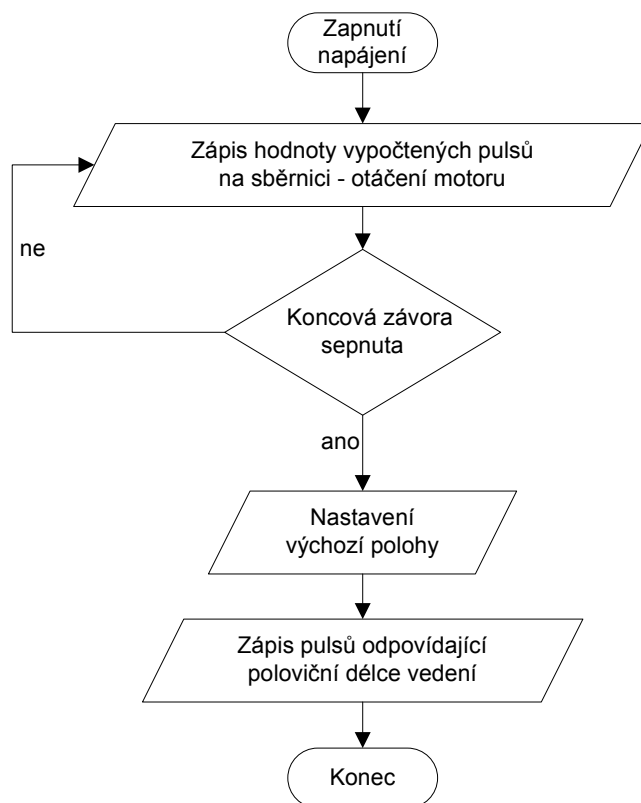
Koncepce návrhu servořízení stanovuje charakter struktury softwarové formy programu. Příkazy musejí být ošetřeny výpočty a stanoveny na základě požadavků. Samotné vykonání příkazů ovládací částí (kontrolérem) je hlídáno zpětnou vazbou. Je zohledněno také řízení komunikace sériové linky, tj. řízení zápisů a čtení zpráv.

Hlavní a zároveň prvotně vytvořená úloha, tzv. Main Task definuje použité proměnné úhlu natočení, nových dat úhlu, erorového stavu a dalších z důvodu bezpečnosti do nulové hodnoty. Tzn, že při resetu nejsou v paměti uloženy žádné hodnoty těchto parametrů.

Následně jsou v hlavní úloze volány funkce **inicializace CAN linky**, **sériové linky RS485** a **inicializační funkce natočení motoru**, přičemž u **inicializace CAN** je nutné vytvoření tasku (procesu) pro příjem a vysílání dat. Tyto procesy musejí být vytvářeny s jistým zpožděním.

U funkce **inicializace natočení motoru** je nejprve povolen zápis vypočtené (maximální) hodnoty pulzů sériové linky. Mechanismem je natáčeno do krajní hodnoty tak dlouho, dokud není poskytnuta informace závory o krajní poloze vedení. Dimenzovaná

doba k vykonání tohoto příkazu je 6 s. Do paměti je opět přes zmíněnou linku zapsána a uložena výchozí hodnota. Po krátké časové prodlevě je zaslán příkaz kontrolérem o otočení motorku o tolik kroků, aby odpovídal středu lineárního vedení tzn. byl nastaven nulový stupeň natočení kol, viz *obr. 24*.

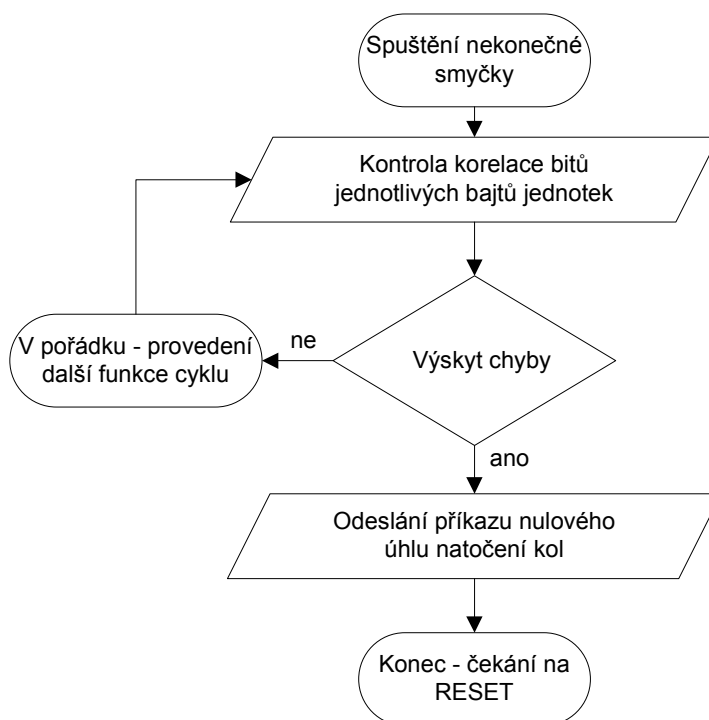


*Obr. 24 Vývojový diagram inicializace polohy*

Posléze je zavedena nejdůležitější smyčka celé aplikace, while. Je definovaná tak, že zapsané funkce jsou vykonávány v nekonečném cyklu (smyčce).

Prvotní podmínka cyklu porovnává stanovené bajty SCU s předem nadefinovanou maskou bajtů. Ta obsahuje takové nastavení bitu, jako by došlo k poruše jednotky. Podmínka zahrnuje všechny jednotky instalované ve vozidle Democar. Při poruše jednotky je volána **chybová** funkce deklarující sériovou linku ke čtení a zápisu.

Následuje vykonání takové funkce, která zapříčiní, že se při poruše nastaví nulový úhel natočení kol, viz vývojový diagram na *obr. 25*. Příslušné vstupy jsou adekvátně nastaveny pro zapsání vypočtené hodnoty. Po **chybové** funkci je nezbytné řídicí jednotku resetovat.



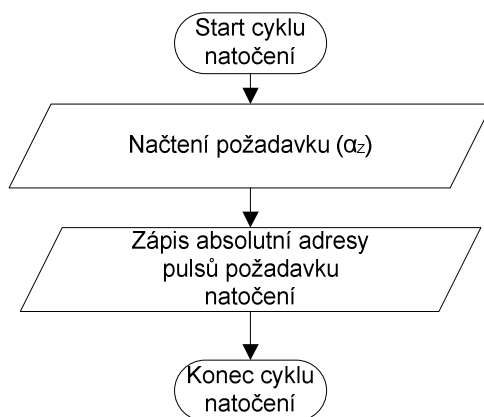
Obr. 25 Dílčí vývojový diagram hlavní smyčky - chyba

Není-li vyvolána chybová funkce, jsou v následující podmínce porovnávány aktuální data. Tělo podmínky ukládá hodnotu úhlu do globální proměnné požadovaného úhlu. Následuje jedna z nejvýznamnějších funkcí celého programu obsažená v nekonečné smyčce, a to funkce přepočtu požadovaného úhlu natočení na pulzy kontroléru.

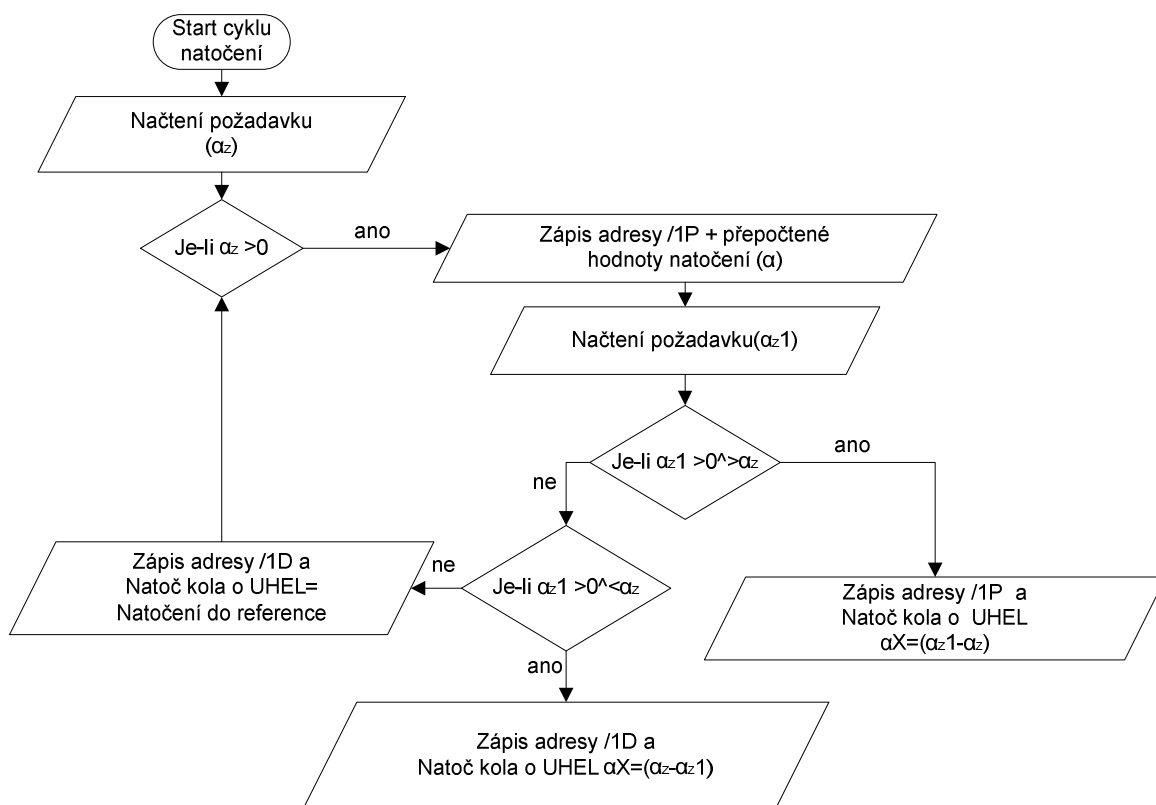
Je to funkce typu void, tzn., nenavrací žádný datový typ. Lokální proměnná konstanta výpočtu ze vzorce 16 a **zapsání pulzů** jsou na začátku funkce v těle s příslušnou hodnotou nedeklarovány. Vlivem zadávání kladného a záporného integeru (celočíslného čísla) úhlu z vysílacího modulu je nezbytné upravit proměnnou **zapsání pulzů** takovým způsobem, aby bylo možné i záporné číslo elegantně převést do bufferu. Potřebný počet otáček krokového motoru k přejetí jezdce lineárního vedení z jedné do druhé strany je 42, což odpovídá 2150400 pulzům. Pro úhel větší než nula byla tedy vytvořena funkce, díky které je vypočteno  $m_{FK}$  s připočtením poloviny maximálních pulzů, tj. 1075200. V případě, že je zadáný úhel záporný, je nejprve vypočtena **proměnná pulzů**, vlivem které je požadovaný úhel přenásoben (-1) a odečten od maximální hodnoty natočení kladného úhlu. Proměnná **zapsání pulzů** je pak **proměnnou pulzů** přenásobená konstantou výpočtu  $k_A$ . Zavedená globální proměnná typu char **zápis do bufferu** o předem stanovené velikosti převádí proměnnou **zapsání pulzů** do ASCII kódu, a to tak, že hexadecimální zápis je přiřazen hodnotám prvků skrze pole (matematickou funkcí je následně přepočítáváno modulo čísla **zapsání pulzů** a může být po jednom vloženo na stanovenou pozici). Provedení požadavku

natočení motoru o požadovaný úhel může být zapsáno buď o natočení na absolutní, nebo relativní polohu.

Výhodnější varianta je natáčení na první zmíněnou polohu, absolutní. V textu jsou uvedeny obě varianty, které jsou i v softwarové formě k dispozici.



Obr. 26 Dílčí vývojový diagram hlavní smyčky – natáčení do absolutní polohy

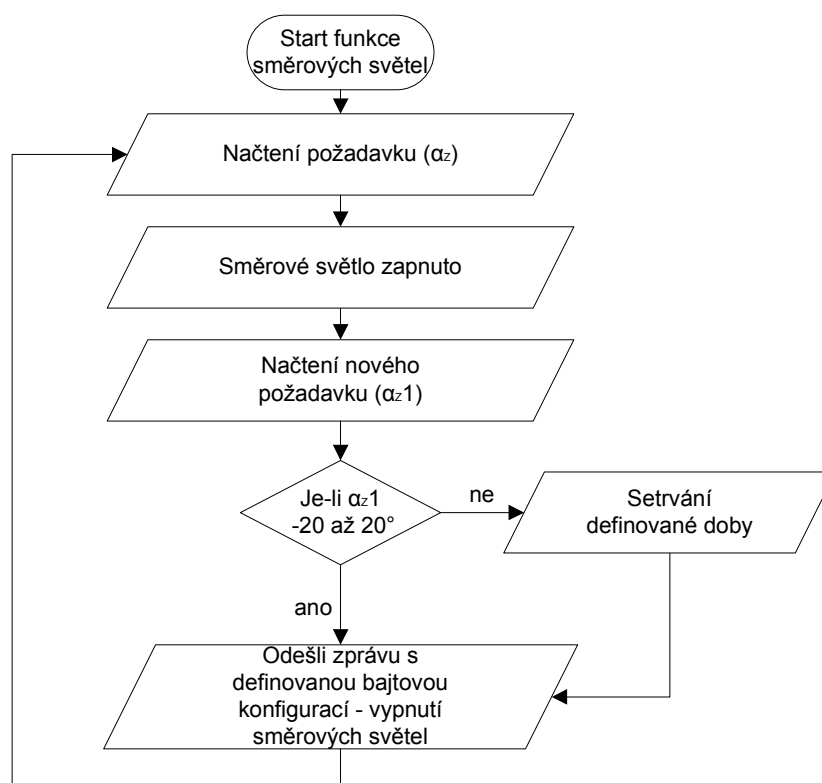


Obr. 27 Kladná polovina vývojového diagramu hlavní smyčky – relativní poloha

Při pohledu na vývojový diagram zobrazený na obr. 27, který představuje pouze kladnou část vývojového diagramu, je patrné, že je nutné definovat větší množství podmínek oproti vývojovému diagramu zobrazenému na obr. 26. Implementace je složitá a

časově náročná. Primárně je použita funkce, prostřednictvím které dochází k vykonání skrze absolutní polohu natáčení.

Po projetí zatačky, resp. změně směru musí být při „návratu“ do nulového úhlu natočení kol vytvořena taková funkce, viz *obr. 28*, která zabezpečí vypnutí směrových světel obdobně jako u klasických osobních vozidel. Funkce **vypínání blinkrů** následuje hned po funkcích, kde dochází k přepočtu do ASCII kódů. Je rozčleněna do tří podmínek. V první a druhé podmínce jsou stanoveny bitové proměnné, kdy je úhel natočení větší a menší než  $20^\circ$ , a v rozmezí těchto dvou hodnot je nakonfigurována hystereze s označením nulového úhlu natočení. Zvolené bity jsou vždy při návratu natočení kol do přímého směru, tj. změně úhlu, posílány skrze komunikační rozhraní jednotce světel, kde je naprogramována funkce adekvátně reagující na tyto bity.



*Obr. 28 Dílčí vývojový diagram hlavní smyčky – směrové světla*

Předposlední funkce hlavní smyčky je funkce typu void **zápis sériové linky**. V prvním kroku jsou vstupy linky nastaveny k zápisům. Následuje konfigurace s nastavením správného datového rámce sériové linky. V datovém rámci je posílána adresa, pulzy motoru a stanovený ukončovací znak. Pořadí zprávy je stanovené. Nezbytným následujícím úkonem je nastavení zmíněných vstupů opět ke čtení.

Po všech podmínkách a vykonaných cyklech je posledním příkazem hlavní funkce nastavení parametrů aktuálních dat, tak aby byla „čerstvá“. Jde o data, která jsou na začátku smyčky while, jak už jednou řečeno, porovnávána. Cyklus se neustále nekonečně opakuje a běží v reálném čase.

## 2.4 Ověření funkčnosti a měření

Prvotní testování v souvislosti s laděním aplikace bylo prováděno bez implementace šasi do vozidla Democar. Osobní počítač s USB CANovým převodníkem zajišťoval skrze program PP2CAN požadované informace úhlu natočení kol  $\alpha_z$ . Převodník je zobrazen na obr. 29.



Obr. 29 Převodník USB2CAN

Po správném nastavení zařízení (portu) v záložce *Options* bylo nutné nastavit ID dané jednotky. Také rychlost přenosu dat byla zvednuta na optimální, tj. 1 Mb/s. Z důvodu atypického zadávání bylo nutné „povolení“ políčka standardního zadávání. Po těchto defaultních nastaveních po každém spuštění programu bylo možné díky 8 políčkům reprezentujícím jednotlivé bajty zprávy zasílat. První bajt byl při deklaraci v programovacím jazyce vyhrazen jako informace úhlu natočení. Poslední bajt nesl informaci stavu.

Jelikož z vysílacího modulu jsou vysílány informace kladného i záporného úhlu natočení, pak bylo nutné v záložce *Tools* a kartě *Data sender* zaškrtnout políčko UINT16. Takto je možné zadávat do prvního bajtu kladné i záporné hodnoty požadovaného úhlu natočení. Ve vrchním okně programu jsou uváděny aktuální informace sběrnice i od dalších jednotek a ve spodním odeslané informace používané jednotky.

K monitorování odezvy sloužila samozřejmě optická kontrola posuvu vedení a také monitorovací prostředí. To bylo zrealizováno USB převodníkem sériové linky

a v teoretické části již zmíněnými monitorovacími terminály. Po připojení převodníku a nastavení portu v záložce *Zařízení a tiskárny* bylo nutné po spuštění vybrat typ použitého kontroléru. Následovalo nastavení konfiguračních parametrů, viz *obr. 11*. Na *obr. 30* a *obr. 31* jsou zmíněná prostředí znázorněna.

Pořadí ID jednotky Požadované úhly natočení Změna State

Nu...	Received time	Type	Id 1	Id 2	Bytes	B0	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7
1	17:43:59.95...	St	900		8	255	255	255	255	255	255	255	1
0	17:43:59.95...	St	800		8	255	255	255	255	255	255	255	1

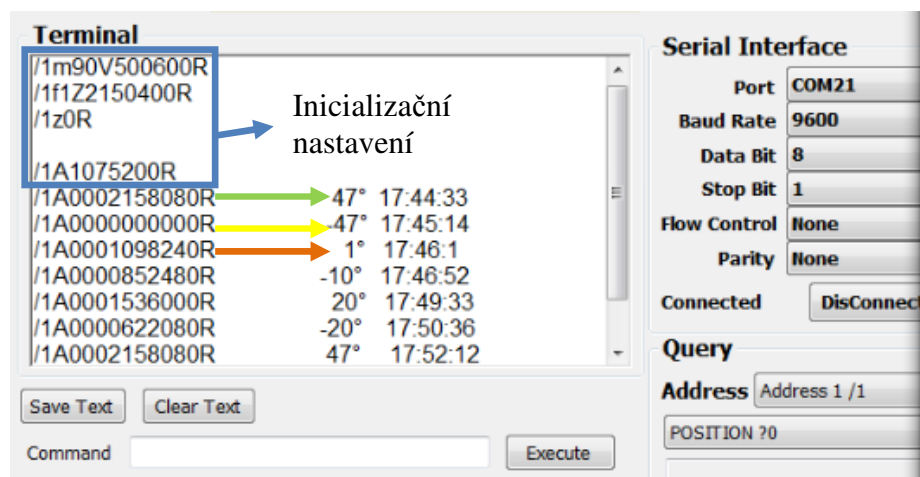
Nu...	Sended time	Type	Id 1	Id 2	Bytes	B0	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7
6	17:52:12.449	St	120		8	47	0	0	0	0	0	0	7
5	17:50:36.702	St	120		8	236	0	0	0	0	0	0	6
4	17:49:33.580	St	120		8	20	0	0	0	0	0	0	5
3	17:46:52.687	St	120		8	246	0	0	0	0	0	0	4
2	17:46:1.397	St	120		8	1	0	0	0	0	0	0	3
1	17:45:14.594	St	120		8	209	0	0	0	0	0	0	2
0	17:44:33.138	St	120		8	47	0	0	0	0	0	0	1

Standard ID 120 Extended ID 0 Length 8 SEND p1 1M  
 47 0 0 0 0 0 0 7 RTR Standard/Extended  
 C:\PP2CAN\w2can.cfg  
 BUILD: WINDOWS TIMERS  
 CAN RESET, baudrate 1M  
 FT\_Open: FT\_DEVICE\_NOT\_OPENED

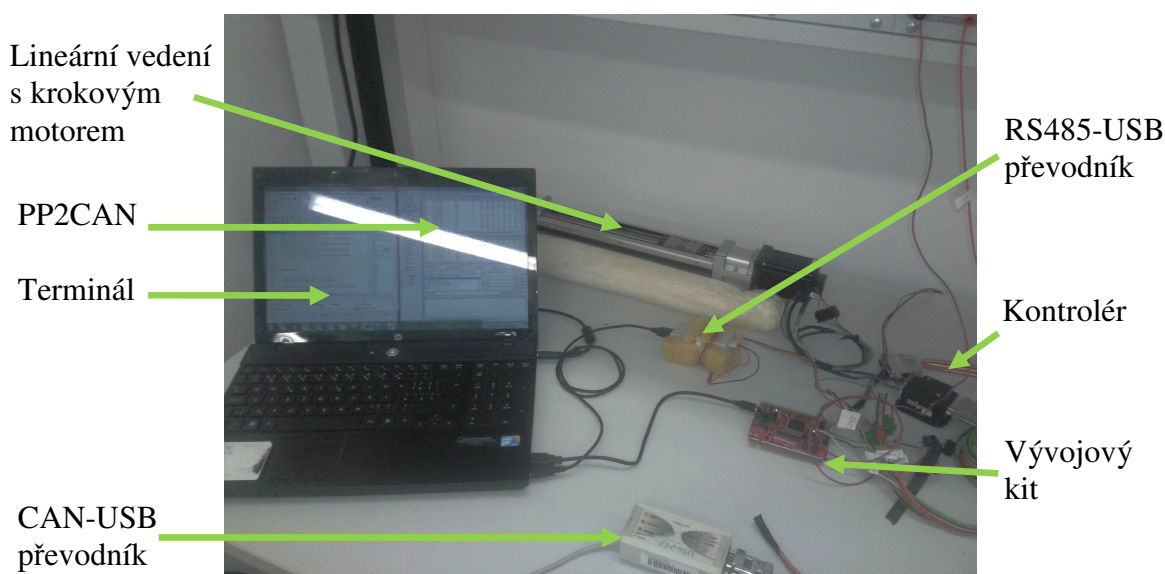
*Obr. 30 Zaslání úhlu natočení skrze program PP2CAN*

Při testování byly postupně zasílány příkazy pro úhel natočení. V zeleném orámování je zvýrazněno pořadí zasílání příkazů. V prvním případě, v pořadí označeném nulou je vidět, že byla sběrnici odeslána požadovaná hodnota úhlu natočení 47°. V druhém případě to byla hodnota -47°, která odpovídá po přepočtu zaslané hodnotě 209. Postupně byly dále na sběrnici zaslány hodnoty 1, -10, 20, -20, 47°. (Defakto, tak byla také prováděna simulace zasílání příkazů z vysílacího modulu).

Na *obr. 31* tj. v monitorovacím prostředí vidíme zprávy odeslané kontroléru aplikace. Po prvotním inicializačním nastavení znázorněné modrým orámováním, je patrné, že motorek koná naprogramovanou strukturu. Závora udává informaci krajní polohy, a motorku je nastavena výchozí hodnota, posléze je poslán do středu vedení, což odpovídá nulovému úhlu natočení kol (1A1075200R). Následující hodnoty odpovídají odeslaným požadavkům úhlu patrné z *obr. 30*.



Obr. 31 Terminál LinControl



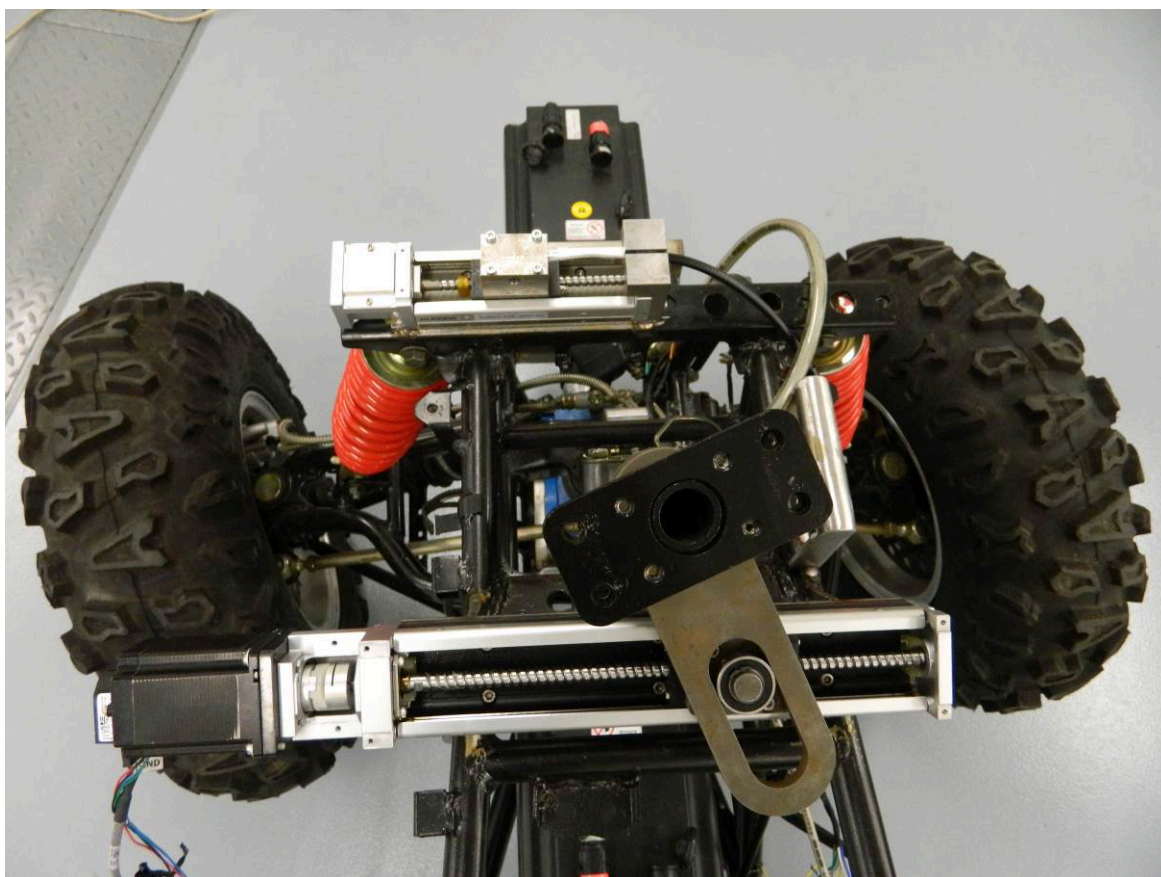
Obr. 32 Ladění funkce

Na obr. 32 jsou vyfotografovány použité komponenty a na PC jsou vyobrazeny více zmíněné dvě prostředí.

Monitorování odesílaných zpráv sériové linky do kontroléru nebylo prováděno pouze skrze monitorovací prostředí (terminály), ale byl využit také osciloskopický přístroj. Po vytvoření externího převodníku díky mikročipu RS485, bylo umožněno zprávy zaznamenávat. Monitor přístroje zaznamenal strukturu zpráv, a skrze převod hexa čísla do ASCII kódů nebyl problém tyto zprávy dešifrovat. Výsledek byl totožný se zaznamenanými odezvami terminálu.

Na obr. 33 je vyfotografována zabudovaná koncepce navrženého servořízení. Z obr. 34 je krásně patrný fakt, že lineární vedení muselo být namontováno pod stejným úhlem jako natáčecí mechanismus. Vedení je ze spodní části rozebíratelně spojeno s plošinou, která je k rámu Democarů přivařena.





*Obr. 33 Implementace servořízení*



*Obr. 34 Democar – se zabudovanou koncepcí servořízení*

### 3 Závěr

Cílem první, teoretické části práce bylo navrhnout celkovou koncepci elektronického servořízení specifického vozidla Democar. K tomuto cíli směřuje řada výpočtů, o které se opírá následná volba mechanických komponent. Pro přiblížení funkcí je připojen teoretický popis, katalogové hodnoty a grafy.

Po zvolení jednotlivých parametrů a vhodného typu pohonu bylo zkonstruováno základní šasi pro zprovoznění samotného pohonu. Zvolená elektronická část skládající se z ŘJ a výkonového stupně je rovněž v práci teoreticky podložena. V prvotních fázích ladění aplikace byl použit pro svou univerzálnost vývojový kit firmy Freescale.

Finální verze pohonu servořízení využívá vlastní navrženou jednotku. Jednotlivé struktury obvodů celkové koncepce jednotky jsou v práci uvedeny a popsány. Rovněž je přiložen osazovací plán relevantní k této části práce s v tabulkou použitých komponent a jejich vlastností. Dále jsou v příloze uvedeny technické výkresy (v teoretické části uvedeného 3D modelu) mechanismu spojení lineárního vedení s řídicí tyčí.

Programovací software s popisem OS je rovněž součástí práce. Strojový kód byl vyvíjen následujícím způsobem: po vyzkoušení naprogramování otáčení hřídele motorku jedním směrem byly vytvářeny smyčky, které umožňují např. pootočení hřídele motorku o určitý počet kroků jedním směrem a po vykonání funkce ihned druhým směrem.

Po změření komponent rámu Democar byl vypočten přepočten natáčení, který byl do strojového kódu implementován. Softwarem PP2CAN byl simulován určitý požadovaný úhel natočení. Jezdec vedení vždy ujel stanovenou vypočtenou dráhu. Ani funkce zajišťující bezpečnost nesmějí být opomenuty, a to jak prvky aktivní, tak také pasivní bezpečnosti.

Navržená koncepce byla v laboratorních podmínkách odladěna, čímž byla ověřena funkčnost. Posledním krokem byla zástavba servořízení do struktury vozidla Democar.

Na základě výše uvedených výsledků lze považovat zadání předkládané diplomové práce Návrh a realizace systému servořízení demonstračního vozidla s elektrickým pohonem za splněné.

## 4 Seznam použité literatury

- [1] DIODES INCORPORATED: *TRANSIL SMBJ30CA* [online]. [cit. 2014-04-15].  
<http://html.alldatasheet.com/html-pdf/59344/DIODES/SMBJ30CA/182/1/SMBJ30CA.html>
- [2] EPCOS AG: *CÍVKA B82462G4223M* [online]. [cit. 2014-04-10].  
<http://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/327392/EPCOS/B82462G4223M000.html>
- [3] FORMÁNEK, J. *Návrh a praktická realizace elektronického servořízení*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Univerzitní studijní programy, 2013. Vedoucí práce: Šimoník, P.
- [4] FRESCALE SEMICONDUCTOR: *PXS20* [online]. [cit. 2014-03-29]. Dostupné z:  
<http://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/474622/FREESCALE/PXS20.html>
- [5] GOES:625i *Limited Edition*: [online]. [cit. 2014-02-24]. Dostupné z: <http://www.atv-goes.cz/katalog/ctyrkolky/goes-625i/goes-625i-limited-edition>
- [6] HEGDE, Ganesh S. *Mechatronics*. Sudbury, Mass., c2010, xxi, 281 p. Engineering series (Sudbury, Mass.). ISBN 978-193-4015-292.
- [7] HWGROUP: *HERCULES*: [online]. [cit. 2014-03-28]. Dostupné z:  
[http://www.hw-group.com/products/hercules/index\\_cz.html](http://www.hw-group.com/products/hercules/index_cz.html)
- [8] ISERMANN, Rolf. *Mechatronische Systeme Grundlagen; mit 103 Tabellen*. 2., vollst. neu bearb. Aufl. Berlin: Springer, 2008. ISBN 978-354-0323-365.
- [9] KEIL TM: *KONEKTOR JTAG*: [online]. [cit. 2014-04-17].  
[http://www.keil.com/support/man/docs/ulink2/ulink2\\_hw\\_connectors.htm](http://www.keil.com/support/man/docs/ulink2/ulink2_hw_connectors.htm)
- [10] KOPEČNÝ, Jan. *Fyzika pro bakaláře: pomocná učebnice pro školy technického zaměření*. 1. vyd. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 2006, xiv, 914 s. ISBN 80-248-1200-2.
- [11] Krokové motory. *Elektronika* [online]. 18. 2. 2012 22:16 [cit. 2014-02-23]. Dostupné z: <http://www.dvorakpetr.cz/index.php/elektronika/92-krokovye-motory>
- [12] KURODA: *SG SERIES*: [online]. [cit. 2014-02-29]. Dostupné z: [http://www.kuroda-precision.co.jp/e-top/CAT\\_DL/e-BS\\_BSActuator/e6\\_tyokudou/00e0d/04e03.pdf](http://www.kuroda-precision.co.jp/e-top/CAT_DL/e-BS_BSActuator/e6_tyokudou/00e0d/04e03.pdf)

- [13] LEINVEBER, Jan. *Strojnické tabulky: pomocná učebnice pro školy technického zaměření*. 3. dopl. vyd. Úvaly: ALBRA, 2006. ISBN 80-736-1033-7
- [14] LINCONTROL: [online]. [cit. 2014-03-27]. Dostupné z:  
<http://lincontrol.software.informer.com/>
- [15] LINEAR TECHNOLOGY: *LTC485*: [online]. [cit. 2014-04-10].  
<http://html.alldatasheet.com/html-pdf/70869/LINER/LTC485/125/1/LTC485.html>
- [16] LINENGINEERING: *KONTROLÉR R356*: [online]. [cit. 2014-03-27]. Dostupné z:  
<http://www.linengineering.com/drivers-Controllers/R356.aspx>
- [17] MICROCON: *LINEÁRNÍ VEDENÍ*: [online]. [cit. 2014-02-29]. Dostupné z:  
<http://www.microcon.cz/pdf2014/36-39.pdf>
- [18] MQX: *RTOS* [online]. [cit. 2014-04-04]. Dostupné z:  
<http://www.hw.cz/novinky/freescale/co-umoznuje-a-programatorovi-prinasi-rtos-mqx-od-freescale-1dil.html>
- [19] PHILIPS SEMICONDUCTORS: *CAN PCA82C250T* [online]. [cit. 2014-04-11].  
<http://html.alldatasheet.com/html-pdf/18119/PHILIPS/PCA82C250T/503/2/PCA82C250T.html>
- [20] RMSMOTION: [online]. [cit. 2014-03-19]. Dostupné z:  
[http://www.rmsmotion.com/resources/IMC23-R356%20commands%20Rev%201.11\\_991763.pdf](http://www.rmsmotion.com/resources/IMC23-R356%20commands%20Rev%201.11_991763.pdf)
- [21] ŘEŠÁTKO, Miloš. *Fyzika B*. 2. vyd. 24.2.1984.
- [22] ŘEZÁČ, Kamil. *ELEKTRONIKA: KROKOVÉ MOTORY* [online]. 28. 10. 2012 [cit. 2014-02-23]. Dostupné z:  
<http://robotika.cz/articles/steppers/cs>
- [23] SERVODRIVE: *KROKOVÝ MOTOR 5718L-01P*: [online]. [cit. 2014-03-13].  
Dostupné z: [http://www.servo-drive.cz/krokovy\\_motory/krokovy\\_motor\\_5718L-01P.php](http://www.servo-drive.cz/krokovy_motory/krokovy_motor_5718L-01P.php)
- [24] STMICROELECTRONICS: *REGULÁTOR LE33CD*: [online]. [cit. 2014-04-06].  
Dostupné z: <http://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/243324/STMICROELECTRONICS/LE33CD-TR.html>
- [25] ŠROUBOVÉ SPOJE: [online]. [cit. 2014-02-28]. Dostupné z:  
[http://www.ingjars.estranky.cz/file/5/mathcad---sroub\\_3.pdf](http://www.ingjars.estranky.cz/file/5/mathcad---sroub_3.pdf)

- [26] TAKÁČ, J. *Návrh modelu struktury vnitřní diagnostiky elektronických systémů elektromobilu*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Univerzitní studijní programy, 2013. Vedoucí práce: Šimoník, P.
- [27] TEXAS INSTRUMENTS: *PŘEVODNÍK*: [online]. [cit. 2014-04-26].  
<http://html.alldatasheet.com/html-pdf/119930/TI/SN74CBTD3384C/30/1/SN74CBTD3384C.html>
- [28] TRACOPOWER: *REGULÁTOR TSR1-2450*: [online]. [cit. 2014-04-08]. Dostupné z:  
<http://html.alldatasheet.com/html-pdf/312813/TRACOPOWER/TSR1-2450/602/1/TSR1-2450.html>
- [29] TWR-PXS20 User Guide. [Uživatelská příručka]: Axiom Manufacturing, 2011. DOC-0559-010, rev A.
- [30] VISHAY: *DIODA: 10BQ060* [online]. [cit. 2014-04-08].  
<http://html.alldatasheet.com/html-df/68009/IRF/10BQ060/46/1/10BQ060.html>
- [31] ZÁKLADY STROJÍRENSTVÍ: [online]. [cit. 2014-02-24]. Dostupné z:  
[http://skola.spectator.cz/3\\_SEMESTR/Z%e1kl.stoj%edrenstv%ed/PrednaskyRAW/p8.pdf](http://skola.spectator.cz/3_SEMESTR/Z%e1kl.stoj%edrenstv%ed/PrednaskyRAW/p8.pdf)

## **5 Seznam příloh**

Příloha A	Technický výkres natáčekého mechanismu
Příloha B	Osazovací plán SCU s tabulkou použitých komponent